



Tiago André Alves Cardoso Pereira

Licenciado em Engenharia Mecânica

**Sistema para Utilização de Flexibilidade Energética em
Dispositivos de Aquecimento e Armazenamento de
Águas Quentes Sanitárias**

Dissertação para obtenção de Grau de Mestre
em Engenharia das Energias Renováveis

Orientador: Doutor Rui Miguel Amaral Lopes,
Professor Auxiliar Convidado, FCT/UNL
Coorientador: Doutor João Francisco Alves Martins,
Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Almeida Rosa, FCT/UNL
Arguente: Prof. Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira, FCT/UNL
Vogal: Prof. Doutor Rui Miguel Amaral Lopes, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Sistema para Utilização de Flexibilidade Energética em Dispositivos de Aquecimento e Armazenamento de Águas Quentes Sanitárias

Copyright © Tiago André Alves Cardoso Pereira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e namorada

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Rui Lopes e ao meu co-orientador, Professor Doutor João Martins, por toda a disponibilidade, motivação, apoio e sobretudo, ensinamentos ao longo deste ano. Muito obrigado por me terem possibilitado a realização desta dissertação.

Agradeço ao Professor Fernando Coito, ao Professor Luís Brito Palma e ao Fábio Januário por terem ajudado e possibilitado a realização do caso de estudo. Ao Humberto Queiroz, pela sua amizade e troca de experiências. Agradeço aos meus colegas de curso por toda a ajuda, companheirismo, aprendizagens e acima de tudo amizade, em especial ao Diogo Salvaterra e à Inês Martins.

Aos meus queridos pais, pela educação, carinho, apoio, orientação e sobretudo pelos sacrifícios que fizeram para eu chegar aqui, tudo isto seria impossível sem eles.

E por fim, um especial agradecimento à Carolina, por toda a compreensão, paciência, apoio e acima de tudo amor e amizade, que tornaram este percurso mais fácil.

Resumo

O presente trabalho propõe um sistema para o estudo da flexibilidade energética considerando dispositivos de aquecimento e armazenamento de águas quentes sanitárias. O sistema apresentado, designado por *Efsyst*, segue uma abordagem modular, e permite aos utilizadores desenvolverem e validarem métodos *Demand Response* que explorem esta flexibilidade.

A flexibilidade energética representa a capacidade de um sistema alterar o seu consumo ou produção de energia em resposta a certos sinais externos, respeitando as necessidades da rede e do consumidor. Como tal, de modo a ter uma rede elétrica estável e confiável, a flexibilidade energética apresenta-se como parte integrante para a resolução do eventual desequilíbrio entre períodos de geração e consumo de energia elétrica causado por fontes renováveis.

O *EFsyst* foi implementado num caso de estudo laboratorial com o objetivo de explorar a flexibilidade energética de um termoacumulador. Ao longo das experiências efetuadas foi possível comprovar a correta implementação do sistema, cumprindo o objetivo de redução dos custos associados ao consumo de energia elétrica.

Termos Chave: Flexibilidade Energética, *Demand Response*, Águas Quentes Sanitárias, Energia Renovável.

Abstract

The work reported in this dissertation proposes a system for the study of energy flexibility considering domestic hot water heating and storage devices. The proposed system, called *Efsyst*, follows a modular approach and allows users to develop and validate Demand Response methods that exploit this flexibility.

Energy flexibility is the ability of a system to change its energy consumption or generation output in response to certain external signals, while respecting the needs of energy grids and consumers. As such, in order to have a stable and reliable power grid, energy flexibility is considered part of a solution for the eventual imbalance between periods of generation and consumption of electricity from renewable sources.

EFsyst was implemented considering a real case study to explore the energy flexibility of an electric water heater. Throughout the experiments it was possible to assess the correct implementation of the system, fulfilling the objective of reducing the costs associated with the consumption of electricity.

Key Words: Energy Flexibility, Demand Response, Domestic Hot Water, Renewable Energy.

Índice de Conteúdos

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivação.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura.....	2
Capítulo 2 – Estado da Arte	5
2.1. Flexibilidade Energética.....	5
2.2. Utilização da Flexibilidade Energética em AQS.....	5
2.2.1. Redução de Custos.....	6
2.2.2. Otimização do autoconsumo de energia solar	16
2.2.3. Otimização do autoconsumo de energia eólica	20
2.3. Discussão	23
Capítulo 3 – Solução Proposta	25
3.1. Arquitetura do Sistema	25
3.1.1. Módulo de Monitorização e Atuação	26
3.1.2. Módulo de Armazenamento de Dados	28
3.1.3. Módulo Interface	28
3.1.4. Módulo de Controlo do Consumo de Águas Quentes Sanitárias	28
3.1.5. Unidade de Controlo Remoto	28
3.2. Implementação.....	28
3.2.1 Módulos do sistema.....	29
3.2.2. Lista de Componentes Utilizados	38
3.2.3. Estrutura para o Suporte do Termoacumulador.....	39
3.2.4. Ligações Hidráulicas e seus Componentes.....	39
Capítulo 4 – Resultados e Análise	41
4.1. Caso de Estudo Laboratorial	41
4.2. Utilização da Flexibilidade Energética	44
4.2.1. Cenário O – Funcionamento original do termoacumulador	44
4.2.2. Cenário T50 – Controlo por regras com temperatura máxima de 50°C	46
4.2.3. Cenário T55 – Controlo por regras com temperatura máxima de 55°C	49

4.2.4. Análise de Resultados	51
Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros	59
5.1. Contribuições	59
5.2. Trabalhos Futuros	60
Referências Bibliográficas	61
Anexo A – Resultados das experiências associadas ao caso de estudo	65

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Gráfico de intervalos da carga da rede no estudo de K.Al-jabery et aldas. [13]	8
Figura 2.2 – Modelo de otimização usado no trabalho de P. Kepplinger et al. [15].....	10
Figura 2.3 – Diagrama de consumo de água quente do trabalho de V.Kapsalis et all. [16].....	11
Figura 2.4 – Diagrama de temperaturas do controlo pelo algoritmo genético e convencional. [17].....	13
Figura 2.5 – Comparação da potência média do controlo pelo algoritmo genético face ao convencional. [17].....	13
Figura 2.6 – Comparação do controlo a partir do Q-learning com o controlo por termostato. [19]	15
Figura 2.7 – Representação do modelo de gestão de energia do edifício apresentado por M. Heleno et all. [21]	16
Figura 2.8 – Resultados do controlo otimizado na investigação de M. Heleno et al. [21]	17
Figura 2.9 – Custo nivelado de energia das diferentes configurações e potências da instalação solar numa tarifa simples. [10]	19
Figura 2.10 – Custo nivelado de energia das diferentes configurações e potências de instalação solar numa tarifa bi-horária. [10]	19
Figura 2.11 – Fração solar das várias configurações. [10]	20
Figura 2.12 – Perfil de consumo de água quente usado na investigação de N. Fitzgerald et al. [22]..	22
Figura 2.13 – Resultados obtidos no trabalho de N. Fitzgerald et al. [22]	22
Figura 3.1 – Arquitetura do EFsyst.....	26
Figura 3.2 – Divisor de tensão utilizado para determinar T1.	29
Figura 3.3 – Fluxograma do levantamento dos dados no MMA.	31
Figura 3.4 – Fluxograma do envio de dados e obtenção do funcionamento realizado pelo MMA.	33
Figura 3.5 – Circuito elétrico do MMA	34
Figura 3.6 – Exemplo dos gráficos apresentados da interface gráfica da Plataforma ThingSpeak.	36
Figura 3.7- Esquema Elétrico do MCCAQS	37
Figura 3.8 – Estrutura de suporte para o Termoacumulador.	39
Figura 3.9 – Esquema hidráulico da implementação do EFsyst	40
Figura 4.1 – Configuração interna do termoacumulador utilizado	42
Figura 4.2 – Montagem associada à experiência laboratorial para a realização do caso de estudo. ..	43
Figura 4.3 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 08:00.	45
Figura 4.4 – Temperatura das águas de entrada e de saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 08:00.	45
Figura 4.5 – Temperatura interna e funcionamento do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 08:00.	48
Figura 4.6 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 08:00.....	48
Figura 4.7 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 08:00.....	50

Figura 4.8 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 08:00.	50
Figura 4.9 – Temperaturas ambiente durante as experiências.	51
Figura 4.10 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T50 e ao Cenário O para vários consumos de água quente.	53
Figura 4.11 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T55 e ao Cenário O para vários consumos de água quente.	54
Figura 4.12 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T50 e ao Cenário O para vários consumos de água quente, usando a tarifa tri-horária.	56
Figura 4.13 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T55 e ao Cenário O para vários consumos de água quente, usando a tarifa tri-horária.	56
Figura 4.14 – Temperatura interna e funcionamento no cenário T50 com consumo às 16:00	57
Figura A.1 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 00:00.	65
Figura A.2 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 00:00.....	65
Figura A.3 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 04:00.	66
Figura A.4 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 04:00.....	66
Figura A.5 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 08:00.	66
Figura A.6 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 08:00.....	66
Figura A.7 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 12:00.	66
Figura A.8 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 12:00.....	66
Figura A.9 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 16:00.	66
Figura A.10 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 16:00.....	66
Figura A.11 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 20:00.	66
Figura A.12 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 20:00.....	66
Figura A.13 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 00:00.	66
Figura A.14 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 00:00.....	66

Figura A.15 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 04:00.	66
Figura A.16 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 04:00.	66
Figura A.17 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 08:00.	66
Figura A.18 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 08:00.	66
Figura A.19 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 12:00.	66
Figura A.20 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 12:00.	66
Figura A.21 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 16:00.	66
Figura A.22 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 16:00.	66
Figura A.23 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 20:00.	66
Figura A.24 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 20:00.	66
Figura A.25 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 00:00.	66
Figura A.26 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 00:00.	66
Figura A.27 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 04:00.	66
Figura A.28 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 04:00.	66
Figura A.29 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 08:00.	66
Figura A.30 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 08:00.	66
Figura A.31 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 12:00.	66
Figura A.32 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 12:00.	66
Figura A.33 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 16:00.	66
Figura A.34 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 16:00.	66

Figura A.35 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 20:00.	66
Figura A.36 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 20:00.	66

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo da Revisão de Literatura.....	23
Tabela 3.1 – Lista de Componentes Utilizados.....	38
Tabela 4.1 – Preços da Tarifas Bi-horária e Tri-horária utilizados.....	52
Tabela 4.2 – Custos e energia consumida dos três cenários com consumo às 08:00.....	52
Tabela 4.3 – Custos, Energia consumida e poupanças do Cenário T50 e do Cenário O.	53
Tabela 4.4 – Energia consumida no cenário O e T55.....	54
Tabela 4.5 – Temperatura da água quente consumida nos três cenários (00:00 e 04:00).	55
Tabela 4.6 – Custos e poupanças com uma tarifa tri-horária.	57

Lista de Acrónimos e Siglas

°C	Graus Celsius
Ω	Ohm
μ C	Microcontrolador
AQS	Águas Quentes Sanitárias
API	<i>Application Programming Interface</i>
CAD	<i>Computer Assisted Design</i>
DR	<i>Demand Response</i>
EV	Eletroválvula
FE	Flexibilidade Energética
HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
MAD	Módulo de Armazenamento de Dados
MMA	Módulo de Monitorização de Atuação
MCCAQ	Módulo de Controlo do Consumo de Água Quente
RT	Termístor
T1	Temperatura de Entrada no Termoacumulador
T2	Temperatura de Saída do Termoacumulador
Tint	Temperatura Interna do Termoacumulador
Tamb	Temperatura Ambiente
UCR	Unidade de Controlo Remoto
VC	Válvula de Corte
VRC	Válvula Reguladora de Caudal
VS	Válvula de Segurança

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo começa por apresentar o enquadramento deste trabalho na Secção 1.1, onde é descrito a importância do conceito de Flexibilidade Energética e a motivação para este ser explorado. De seguida, na Secção 1.2, é exposto o objetivo global desta dissertação, bem como o objetivo do caso de estudo realizado. Por fim, na Secção 1.3, é apresentada a estrutura deste documento.

1.1. Enquadramento e Motivação

Os sistemas de energia encontram-se numa época de transição, onde a produção centralizada em centrais baseadas em recursos fósseis está gradualmente a transformar-se numa produção descentralizada a partir de fontes renováveis, tais como centrais solares e parques eólicos [1]. Esta transição, apesar de contribuir para resolver os problemas globais de sustentabilidade, traz desafios para a rede elétrica devido à elevada variabilidade das fontes renováveis. Ao mesmo tempo em que ocorre esta transição, existe um aumento da eletrificação da procura energética, onde a necessidade de substituir veículos alimentados com combustíveis fósseis por veículos elétricos, ou a substituição de equipamentos de aquecimento com funcionamento a partir de energia fóssil por bombas de calor, são exemplos comuns.

De modo a ter uma rede elétrica estável e confiável, a utilização da flexibilidade energética assume-se como parte integrante para a resolução do desequilíbrio entre geração e consumo [2]. Esta flexibilidade diz respeito à capacidade de um sistema alterar o seu consumo ou produção de energia, não pondo em causa o conforto e todas as necessidades, tanto da rede como do consumidor, em resposta a certos sinais externos, como, por exemplo, a própria variabilidade de uma fonte de energia [3]. Tanto o lado da procura, como o lado da produção podem oferecer flexibilidade energética, sendo que no primeiro o sistema em questão consegue modificar o seu consumo de energia (e.g. modificar os períodos de consumo), enquanto que no segundo o referido sistema consegue modificar o seu perfil de produção num espaço de tempo relativamente curto.

O setor residencial nos países da OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), consome em média cerca de 25% da energia final a nível mundial [4]. Dentro deste setor, nos países europeus, 14% da energia elétrica consumida é usada em aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS). Nos Estados Unidos da América corresponde a 18% da energia elétrica [5]. Estando em causa grandes quantidades de energia, estas percentagens mostram que poderá existir margem para melhorar o consumo de energia elétrica utilizando a flexibilidade energética disponibilizada por dispositivos de aquecimento e armazenamento de AQS.

Posto isto, o foco deste trabalho assenta na flexibilidade energética do lado da procura, cuja utilização poderá contribuir para a solução dos problemas referidos anteriormente. Mais

concretamente, neste documento é apresentado o desenvolvimento de um sistema que possibilita o estudo da flexibilidade energética disponibilizada por dispositivos de aquecimento e armazenamento de águas quentes sanitárias. Além disso, este trabalho também foca um caso de estudo onde este sistema é utilizado para reduzir os custos associados ao consumo de energia elétrica de um termoacumulador.

1.2. Objetivos

O principal objetivo do trabalho descrito nesta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema que possibilita o estudo da flexibilidade energética disponibilizada por equipamentos de aquecimento e armazenamento de AQS em ambiente real e assim suportar o desenvolvimento de métodos de *Demand Response* (DR) que utilizam esta flexibilidade. Neste trabalho, o sistema desenvolvido é testado considerando um caso de estudo onde a flexibilidade energética existente é utilizada para diminuir os custos associados ao consumo de energia elétrica de um dispositivo de aquecimento e armazenamento de AQS frequentemente utilizado no setor residencial.

1.3. Estrutura

Este documento está organizado e estruturado em cinco capítulos, incluindo o presente; são eles: Introdução, Estado de Arte, Solução Proposta, Resultados e Análise e Contribuições e Trabalhos Futuros.

- Capítulo 2 - Estado de Arte

O segundo capítulo apresenta o estado de arte da utilização da flexibilidade energética em dispositivos de aquecimento e armazenamento térmico de AQS de forma a atingir diversos objetivos, tais como redução de custos, aumento do autoconsumo de energia solar, entre outros.

- Capítulo 3 – Solução Proposta

No terceiro capítulo, denominado Solução Proposta, é realizada a descrição conceptual do sistema EFsyst e a sua implementação num sistema de aquecimento e armazenamento de AQS, mais especificamente, num termoacumulador.

- Capítulo 4 – Resultados e Análise

No quarto capítulo, designado por Resultados e Análise, é descrito o caso de estudo realizado num termoacumulador real, bem como os resultados obtidos.

- Capítulo 5 – Contribuições e Trabalhos Futuros

No quinto e último capítulo, são apresentadas as contribuições da investigação realizada e mencionados os trabalhos futuros que levariam a possíveis melhorias do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2 – Estado da Arte

O presente capítulo começa por apresentar o conceito de flexibilidade energética na Secção 2.1 (focando o lado da procura). De seguida é apresentado o estado de arte onde a flexibilidade energética é explorada em equipamentos elétricos para AQS na Secção 2.2, focando-se no final, no termoacumulador. Dentro desta secção, os estudos revistos são divididos nas três subsecções seguintes dependendo do seu objetivo: redução de custos (Secção 2.2.1); otimização do autoconsumo de energia solar (Secção 2.2.2); e otimização do autoconsumo de energia eólica (Secção 2.2.3). Este capítulo termina com uma discussão sobre a revisão do estado da arte realizada

2.1. Flexibilidade Energética

Como descrito na Secção 1.1., a flexibilidade energética diz respeito à capacidade de um sistema adaptar a sua produção ou consumo de energia, sem colocar em causa o conforto e todas as necessidades, tanto da rede como do consumidor, em resposta a sinais externos. Esta capacidade tem importância relevante quando existe elevada penetração de sistema de conversão de energia baseados em fontes de energia renováveis [6]–[9]. No caso da flexibilidade do lado da procura, esta traduz a capacidade de um equipamento alterar o seu consumo de energia beneficiando o consumidor e outras entidades. Por exemplo, a flexibilidade energética existente poderá ser utilizada para aumentar o consumo de energia elétrica de um equipamento em períodos associados a tarifas mais reduzidas e com o objetivo de diminuir o consumo durante períodos mais caros.

2.2. Utilização da Flexibilidade Energética em AQS

Focando em equipamentos elétricos para AQS, devido à grande fatia de consumo de energia, AQS é considerada uma área de grande potencial para a exploração da flexibilidade energética destes equipamentos, como bombas de calor, sistemas solares térmicos e termoacumuladores. Ao utilizar a flexibilidade energética, deve-se considerar também o conceito designado por “*Demand Response*” que é definido como um ajuste voluntário e temporário do consumo de energia elétrica por parte do consumidor final, ou por parte de um fornecedor do serviço para o consumidor final, em resposta a sinais externos [10].

As bombas de calor são equipamentos que extraem o calor do exterior e usam-no para o aquecimento da água que se encontra dentro de um reservatório a partir do funcionamento de um ciclo termodinâmico de bomba de calor. Os coletores solares usam a energia solar como fonte principal para o aquecimento de AQS, mas devido à variabilidade existente desta fonte ainda precisam de um aquecedor auxiliar para reaquecer a água em alguns períodos. Como existem estes aquecedores auxiliares que normalmente têm um funcionamento semelhantes aos termoacumuladores, que possibilitam o aquecimento e armazenamentos de AQS, estes

sistemas conseguem disponibilizar alguma FE e trazer alguns benefícios com a sua exploração a partir de DR. O estudo de *Neves, D et al* [11], é um exemplo concreto em que se tenta utilizar coletores solares e bombas de calor numa ilha isolada, mais precisamente a ilha do Corvo, no arquipélago dos Açores, agregando-os e controlando-os a partir de um fornecedor de energia da ilha. O objetivo final foi reduzir custos de operação, aumentando o autoconsumo eólico, solar e diminuindo o consumo de combustível.

E por fim tem-se o equipamento que será utilizado no caso de estudo apresentado neste trabalho, o termoacumulador. Este é um equipamento de AQS constituído por um tanque isolado termicamente do exterior, onde a água é aquecida e armazenada. A água é aquecida por um ou mais elementos de aquecimento que são normalmente resistências elétricas, cujo número varia conforme o tamanho do equipamento. De forma a proteger o tanque da corrosão e da acumulação de calcário ainda existe um ânodo de magnésio no interior do tanque. Existem duas configurações de termoacumuladores dependendo da posição de funcionamento, vertical ou horizontal. Devido à diferença de densidade, a água que se encontra mais fria fica na zona inferior do tanque e a que está mais quente na zona superior. No que diz respeito ao controlo do funcionamento normal do termoacumulador, normalmente este é realizado a partir de 2 tipos de termostato, mecânico ou elétrico. O termostato mecânico utiliza uma tira bimetálica, de dois materiais diferentes, que dilata conforme a variação de temperatura, ou pode usar um fluido que expande ou comprime conforme vai variando a temperatura. O termostato elétrico normalmente consiste num controlador que deteta a variação da temperatura a partir de uma resistência que varia conforme a temperatura, controlando assim o funcionamento do equipamento.

Após a revisão da literatura, os vários trabalhos analisados que utilizam o termoacumulador para implementar métodos de DR podem ser divididos em três tópicos principais, de acordo com os seus objetivos específicos. O primeiro diz respeito à redução de custos a partir do preço de energia variável, o segundo refere-se ao aumento do autoconsumo de energia solar e o último encontra-se associado à otimização do autoconsumo de energia eólica.

2.2.1. Redução de Custos

O artigo de P. Du e N. LU, [12] apresenta um algoritmo designado “*two-step linear-sequential-enhanced, multiloop algorithm*”, que planeia o funcionamento dos equipamentos controlados por termostatos, nomeadamente, o funcionamento de um termoacumulador, analisando o consumo de água quente, o conforto do utilizador e previsões de preço instantâneo. Os consumos de água usados são aleatórios usando métodos estocásticos para os prever. O modelo térmico usado é baseado em parâmetros térmicos caracterizados pela própria resistência térmica do termoacumulador e do seu isolamento térmico. O termo “two-step” deriva da previsão do consumo e dos preços para o dia seguinte, e da adaptação desses dados a dados reais, minimizando os erros associados à previsão. Realizadas as previsões, o tempo que o termoacumulador tem de estar ligado é determinado para o dia inteiro, e ao longo desse tempo

é associada uma função de preço ascendente e um limite de preço máximo. O controlo lógico aplicado baseia-se simplesmente em ligar o termoacumulador quando o preço se encontra abaixo desse limite, que posteriormente é verificado com uma função de conforto para impedir que exista desconforto na utilização. À medida que é realizado o controlo, são analisados dados em tempo real do consumo e do preço, usados para adaptar a função de preço que decide o controlo lógico do termoacumulador.

Neste estudo, foram testados cinco controladores: o primeiro, respeitante ao funcionamento tradicional do equipamento; o segundo, relacionado com o funcionamento do termostato sensível a variações de preço; o terceiro, baseado no funcionamento já agendado e sem restrições de conforto; o quarto, idêntico ao terceiro, mas com restrições de conforto e uma restrição de temperatura uniforme, ou seja, considerando a mesma gama de funcionamento, temperatura mínima de 61°C e máxima de 71°C; o último é o mesmo que o quarto, mas com uma gama de temperaturas que varia com o tempo, tal que entre as 13 horas e as 17 horas a gama é de [55, 65] °C, e no resto do dia a gama passa a ser igual à que é usada no controlo descrito anteriormente. A previsão do consumo aleatório é feita a partir de um modelo “*state queueing model of water heater*”, que está sempre a analisar se o termoacumulador está ligado ou desligado e posteriormente é separado o tipo de consumo por tempo de utilização. O modelo estocástico está sempre a tentar corrigir as probabilidades dos acontecimentos para reduzir melhor a diferença entre dados simulados e dados estipulados reais.

Após simulação de todos estes modelos e tipos de controlo concluiu-se que o algoritmo é versátil e que consegue reduzir os custos dependendo do tipo de preferência do consumidor. O controlo que não teve em consideração o conforto do utilizador, obteve grandes poupanças, mas também atingiu temperaturas bastante altas e baixas como uma máxima de 128°C e mínima de 19°C. O controlo que teve melhores resultados e com uma redução de 20% dos custos, foi o último, que tem em conta as restrições de conforto e usa uma gama de temperatura que varia com o tempo.

O artigo de K. Al-jabery et al. [13], apresenta uma comparação entre dois tipos de algoritmos de controlo, mas do mesmo tipo, de programação dinâmica aproximada ou também conhecido por *machine learning*, Q-learning e ADHDP (Action Dependent Heuristic Dynamic Programming). Os autores usaram um termoacumulador com a capacidade de 300 litros, onde as variáveis que definiram o modelo foram a temperatura de saída do equipamento, o consumo instantâneo de água quente e a carga estimada da rede porque o preço varia conforme esta variável. Relativamente aos objetivos, estes dizem respeito à redução dos custos de energia e da carga em períodos onde ocorrem picos de consumo. Além disso, os requisitos de conforto dos utilizadores do termoacumulador devem ser sempre respeitados e ambos os métodos devem ser aplicáveis a todos os modelos deste equipamento.

Ao modelar o sistema para realizar o controlo, K. Al-jabery et al. transformaram as três variáveis do modelo em grupos qualitativos dentro de um sistema difuso, onde o consumo de água quente e a temperatura de saída foram divididos em determinados intervalos de valores, criando três grupos, *Low*, *Medium* e *High*. A carga da rede pode variar entre dois grupos, *Low* e *High* durante o dia. Para além disso, foi adicionada uma variável de lógica *fuzzy* às três variáveis, que varia entre 0 e 1, dando origem a dezoito combinações diferentes e dezoito estados diferentes. Na Figura 2.1, é apresentado o exemplo da carga na rede.

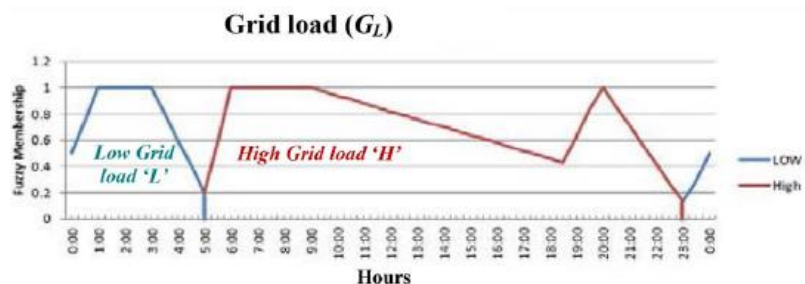


Figura 2.1 – Gráfico de intervalos da carga da rede no estudo de K. Al-jabery et al. [13]

O que difere os dois algoritmos é que o Q-learning aprendeu a adaptar o seu controlo a partir dos Q-factors, que foram sendo otimizados ao longo da aprendizagem. No caso do ADHDP, teve de ocorrer a aprendizagem inicial da rede crítica, ensinando o algoritmo a estimar o custo correto da energia elétrica, para depois poder usar esse custo na aprendizagem da rede de ação (neste caso, correspondente à atuação do termoacumulador), tentando minimizá-lo adaptando-o às variáveis de peso da rede de ação.

Ambos os controlos, na sua fase inicial de aprendizagem, executavam a função de ligar ou desligar o termoacumulador aleatoriamente com a mesma probabilidade. O consumo de água quente foi gerado a partir de um “*event driven simulator*”, com base em estudos, para o dia seguinte. A temperatura da água foi modelada a partir de um modelo térmico simples e a carga na rede dependeu da cidade e do seu perfil característico. Conforme esse estado, durante aquele determinado intervalo de tempo e conforme as três variáveis, foi criada uma determinada recompensa. A partir dessa recompensa ambos os tipos de controlo aprenderam como operar o sistema de modo a poder controlá-lo de forma otimizada. Simulando obtiveram reduções de 26% (Q-learning) e 21% (ADHDP) dos custos em comparação com o funcionamento normal do termoacumulador.

O trabalho de Z. Chen et al. [14], tenta gerir seis equipamentos elétricos: termoacumulador, forno, ar condicionado, veículo elétrico, máquina de lavar a loiça e máquina de lavar a roupa. Essa gestão foi realizada a partir de métodos de DR sensíveis ao preço em tempo real. Foram usadas duas abordagens, uma com base num modelo estocástico que aplica cenários simulados via Monte Carlo, e outra abordagem que tenta reduzir a exigência computacional criada pela abordagem estocástica, que os autores designam como abordagem robusta.

A otimização estocástica usou uma abordagem com base em cenários simulados via Monte Carlo por forma a minimizar o custo de energia elétrica diário, enquanto se controlou o risco associado às incertezas na previsão dos preços reais num intervalo de tempo de cinco em cinco minutos, ou seja, a partir destes cenários o controlador decide a operação para os cinco minutos seguintes. Com o decorrer da otimização, o número de cenários aumentou, o que tornou esta abordagem bastante exigente a nível computacional. A otimização robusta, por sua vez, considerou intervalos de tempo com incertezas de previsão diferentes de forma a ser menos exigente computacionalmente. Ambas as otimizações foram feitas a partir de uma programação linear inteira mista (PLIM), onde cada equipamento teve um controlo diferente conforme as suas limitações.

Em relação ao termoacumulador foi assumido que a temperatura é constante dentro do tanque. As características de operação variaram conforme o volume no interior do tanque; se o volume estivesse entre um valor mínimo e máximo, era considerada uma operação do tipo I (Interrompível e diferenciável); se estivesse abaixo do valor mínimo era considerada uma operação do tipo II (não interrompível e diferenciável). O equipamento está ligado quando o volume e a temperatura interna baixarem do limite mínimo, e desligado quando o volume e a temperatura interna superarem o limite máximo. Para o estudo, considerou-se uma gama de temperaturas de [21; 52] °C e uma gama de volumes de [34; 41,6] litros. São realizados três casos de estudo, um com a abordagem estocástica, mas sem considerar os riscos da previsão dos preços, outro com a abordagem estocástica mais os riscos e por último, é usada a abordagem robusta. Posteriormente os custos totais serão comparados com os custos médios de uma casa normal no estado de Nova Iorque.

Chegou-se à conclusão que em termos de poupanças a otimização estocástica obteve melhores resultados que a robusta, no entanto, em termos de tempo computacional, a robusta teve resultados mais rápidos. No geral, a otimização estocástica reduziu em 26,63% os custos com energia elétrica e a robusta 24,33%. Visto que este trabalho estudou a gestão de vários equipamentos, as informações mais específicas, como por exemplo, o diagrama de consumo de água quente do termoacumulador, não foram especificadas.

A investigação realizada por P. Kepplinger et al. [15] estudou o potencial do termoacumulador para DR a partir de função de custo designada pelos autores de “pseudo-cost function” que é dependente de fatores como a carga na rede, preços de eletricidade e produção de energia renovável. É usado um modelo térmico sem estratificação para formular o problema de otimização como um programa de uma variável binária (ON/OFF) e outro modelo térmico, estratificado para simular o comportamento real do equipamento. A estratégia ótima de funcionamento foi obtida a partir da otimização de um problema de programação de variável binária, que relaciona os consumos de água quente, a temperatura do termoacumulador e a função de custo formulada.

Estes consumos foram previstos através de um algoritmo de *data-mining* usando dados históricos, mas também tiveram em conta a variabilidade destes comportamentos. Os custos são previstos a partir de dados do dia atual para o dia seguinte e atualizados conforme decorreu a simulação. Na Figura 2.2 é apresentado o método de otimização deste trabalho.

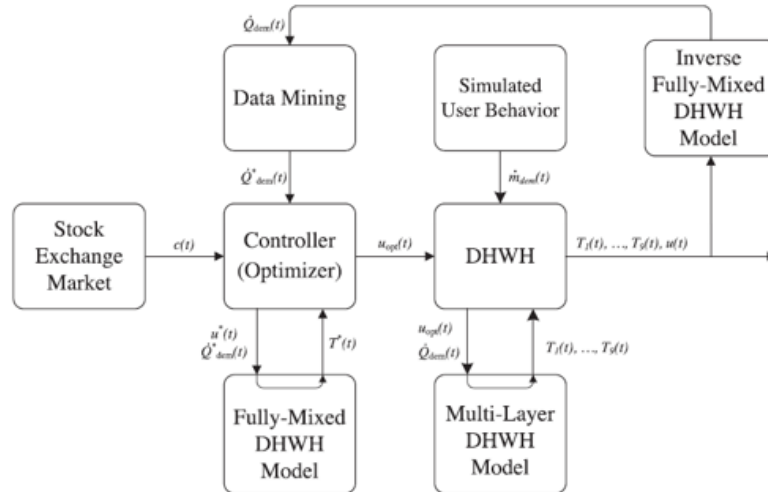


Figura 2.2 – Modelo de otimização usado no trabalho de P. Kepplinger et al. [15]

Foram posteriormente usados diferentes cenários de utilização e comparados com a solução mais comum de deslocar o funcionamento do termoacumulador para alturas da noite. Foram investigados dois casos de estudo onde foram criados dois tipos de consumos com base numa distribuição normal, um deles simulava o comportamento de dois utilizadores e o outro de três. Em cada caso realizaram-se três tipos de controlo diferentes; um em que simplesmente deslocou o funcionamento do equipamento para a noite; outro em que controlou de modo a poupar o máximo de energia consumida possível, considerando a função de custo constante; e o ultimo controlou de modo a funcionar em períodos onde os preços de energia fossem mais baixos, ou seja, períodos onde a função de custo fosse mínima. Cada cenário foi otimizado em função do seu respetivo objetivo e implementado no MATLAB.

No que diz respeito a resultados e comparando com o deslocamento total do funcionamento para a noite, a otimização a partir do preço obteve uma redução entre 3,5% (2 pessoas) e 5,8% (3 pessoas) dos custos, enquanto a otimização a partir do consumo de energia obteve uma redução entre 10,5% e 12,4%. Os autores também concluem que se for num cenário de verão o potencial de poupança é maior devido á produção de energia solar.

No estudo de V. Kapsalis et al. [16], o termoacumulador foi controlado a partir de um algoritmo heurístico que agenda o funcionamento do equipamento a partir de preços de energia variáveis previstos ao longo do tempo. Normalmente este tipo de algoritmos resolvem problemas de forma rápida e eficiente, sacrificando algumas qualidades (i.e.: precisão). Com esta metodologia existe

a possibilidade de operar entre condições que permitem a maior redução de preço, maior conforto para o utilizador ou até mesmo um misto.

Foi feita a dedução da função de conforto a partir da temperatura de saída de água quente e da quantidade de água. Se a temperatura for mais baixa que a preferível num banho de 5L de água, será um nível de desconforto mais desejável do que num banho de 10L a esta temperatura. Logo, o valor desta função variou entre 1 (máximo de desconforto) e 0 (mínimo de desconforto) e se a temperatura for alta é assumido a existência de uma válvula de mistura, onde o utilizador a reduz manualmente. A partir dos preços máximo e mínimo previstos, é criada uma função objetivo que agrega o conforto e o custo e permite, a partir de parâmetros de peso, que o utilizador mude o controlo, como por exemplo, a mudança de um controlo completamente focado no conforto para um intermédio entre conforto e redução de custos.

O modelo térmico é de temperatura uniforme ao longo do tanque porque, segundo os autores, este tipo de modelo tem uma precisão suficiente para o trabalho descrito, face aos modelos mais sofisticados que requerem mais capacidade computacional devido à consideração da estratificação da temperatura ao longo do tanque do termoacumulador. O consumo de água quente é sempre o mesmo seguindo o seguinte perfil de consumo total de 250 litros diários apresentado na Figura 2.3 Os autores não especificaram o número de utilizadores simulados.

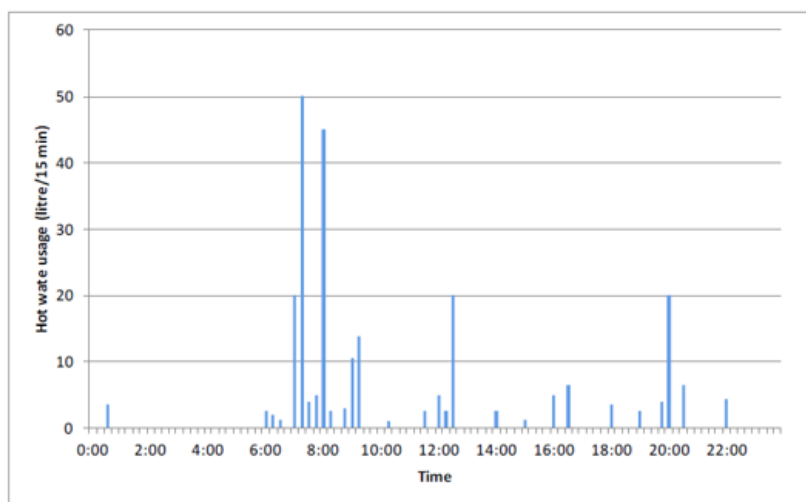


Figura 2.3 – Diagrama de consumo de água quente do trabalho de V.Kapsalis et al. [16]

Inicialmente o algoritmo determinou iterativamente em cada *time-step* o comportamento do termoacumulador, ligando ou não conforme as restrições criadas pelo fator de peso determinado pelas preferências do utilizador como a temperatura preferível, o número de instantes de tempo que a temperatura pode baixar desse limite e a percentagem de custo em relação ao custo mínimo possível. Começou sempre com valor 0 no parâmetro de conforto e a cada iteração irá subir até que as preferências foram atingidas.

Foram realizadas quatro simulações de 24 horas com 96 intervalos de tempo num termoacumulador de 3 kW e 150 litros. Na primeira, o termoacumulador era simplesmente

controlado para obter o mínimo de custos possível sem qualquer conforto. Na segunda, o controlo foi orientado pelo conforto do utilizador. Na terceira, o controlo foi orientado pelos custos e teve em consideração o conforto. E por último foi simulado o funcionamento convencional do termoacumulador para ser comparado. As preferências dos utilizadores foram escolhidas, sendo a temperatura desejada de 40°C, a mínima de 36°C e a máxima de 70°C. Segundo os investigadores a temperatura desejada costuma variar entre os 36,4 e 43°C.

Em termos de resultados o pior foi o controlo para obter custos mínimos, que teve seis intervalos de tempo onde a temperatura era mais baixa do que a temperatura que se escolheu desejada pelo utilizador. O controlo a partir do custo obteve um melhor resultado que o anterior com apenas três intervalos de tempo em que a temperatura era mais baixa que os 40°C. No controlo por conforto não ocorreu nenhum instante de tempo em que a temperatura foi menor que a temperatura preferível.

No que diz respeito a custos e comparado com o funcionamento convencional, o controlo orientado pelo conforto obteve uma redução de 56,6% dos custos de energia elétrica. O estudo ainda varia as características do equipamento como a sua capacidade, potência, temperatura máxima. Após a análise concluiu-se que com o aumento da capacidade a redução de custos é maior pois tem maior potencial de armazenamento. Com o aumento da potência a variação não foi muito grande, só começando a fazer diferença quando chega a valores perto dos 6kW. Por fim, com o aumento do limite máximo da temperatura os custos baixam.

Na investigação de B. Lin et al. [17], procurou-se desenvolver modelos de DR baseados em aprendizagem para termoacumuladores em casas inteligentes de forma a minimizar os custos de energia a partir de um algoritmo genético. Inicialmente foi usado um modelo aprendizagem, baseado em dados, neste caso do termoacumulador, que é designado pelos autores como “*nonlinear autoregressive network with external input (NARX)*”, que são redes neuronais artificiais que conseguem aprender e prever uma serie temporal de dados futuros a partir de dados de series passadas, designadas como o “*external input*”. O modelo foi atualizado diariamente para obter dados mais precisos em relação às condições da vida real. O modelo térmico foi idêntico ao do estudo descrito anteriormente, onde a temperatura é uniforme dentro do tanque, mas apenas considera perdas por convecção.

O padrão de consumos é previsto a partir de métodos de decomposição de séries temporais, sazonais a partir do método designado por “*autoregressive integrated moving average (ARIMA)*”, que é um método bastante definido para realizar previsões não só em engenharia, mas noutras áreas como a economia. Os parâmetros deste modelo foram variados de forma a obter uma variação mais próxima dos dados reais. Os investigadores apresentaram o conceito de capacidade máxima de fornecer água quente, que tem as variáveis de entrada: temperatura mínima aceitável pelos utilizadores; potência do equipamento e a temperatura do tanque. Quando a temperatura do tanque é superior à temperatura mínima aceitável, é definido como água quente, se for o inverso é definido como água fria. Este conceito foi usado para que num

intervalo de uma hora, seja determinada a capacidade máxima disponível nesse intervalo de tempo. Dados como o preço de eletricidade e meteorológicos são obtidos através de uma empresa dos Estados Unidos que os fornece de uma em uma hora, e como consequência, todos os dados tratados nesta simulação são de uma em uma hora. A aprendizagem inicial é feita pelo fornecimento de dados aleatórios, como uma potência dentro do valor nominal de 4500 W, consumos instantâneos, temperatura da água da rede e temperatura ambiente.

O artigo apresenta um algoritmo genético para realizar o controlo subótimo do termoacumulador de forma a minimizar os custos, considerando potências médias. No que diz respeito aos resultados da previsão do consumo de água quente, comparando com dados reais, foi bastante precisa, prevendo 93% dos dados. Prevendo os custos da energia, os resultados do controlo estão apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5:

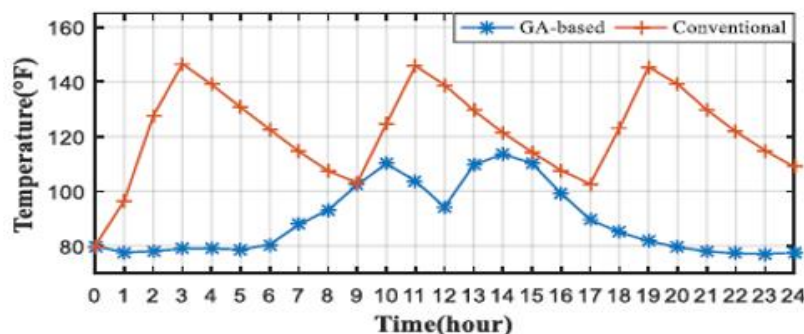


Figura 2.4 – Diagrama de temperaturas do controlo pelo algoritmo genético e convencional. [17]

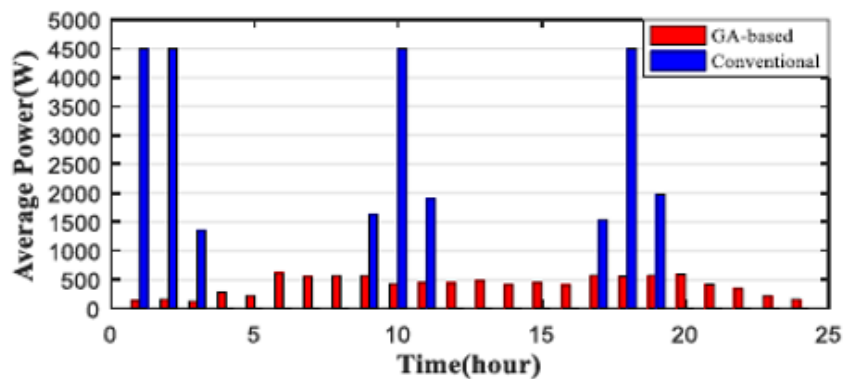


Figura 2.5 – Comparação da potência média do controlo pelo algoritmo genético face ao convencional. [17]

O controlo apresentou uma redução de 49,2% dos custos de energia em comparação com o convencional, num termoacumulador de 190 litros.

No estudo de Q. Wu et al. [18], foi usado um algoritmo de controlo do tipo “Binary Particle Swarm Optimization” para controlar o termoacumulador, tendo o preço da energia como incentivo,

considerando-o diretamente relacionado com a carga na rede. O modelo térmico é de temperatura constante ao longo do tanque semelhante com os outros artigos já referenciados.

O perfil de consumo não é especificado apenas fazem a distinção de 3 tipos de atividades de consumo, a de baixo consumo (0 a 2 litros), médio consumo (2 a 20 litros) e alto consumo (mais de 20 litros). A previsão dos consumos não é especificada na investigação. A simulação usa uma resolução temporal 15 minutos num período de 24 horas com 50 iterações e o intervalo de temperaturas dentro do termoacumulador é de 40°C de mínima e 60°C de máxima.

De seguida compararam os resultados obtidos com o funcionamento normal de um termoacumulador e ainda com outro controlo proposto noutra investigação [5], reduzindo 6% os custos em relação ao funcionamento normal dentro daquela gama e 0,7% em relação à outra investigação, onde não é especificado qual dos algoritmos foram comparados.

Os investigadores F. Ruelens et al. [19], usaram um algoritmo de aprendizagem por reforço, conhecido por Q-learning, para desenvolver um controlador que controla o termoacumulador de forma a reduzir os custos de energia. Onde o perfil de variação do preço é fornecido e previsto por um agente externo. Por se usar um controlo por *machine learning* e também por ter tantos sensores ao longo do tanque, não foi necessário formular um modelo térmico do equipamento pois o controlador foi aprendendo e modelando-o ao longo da experiência. No que diz respeito ao perfil de consumo são usados perfis reais com uma média de consumo diário de 120 litros, que não são especificados no artigo. Inicialmente foi formulado o problema como um problema de cadeias de decisões de Markov, de seguida um vetor de estado observável pelo agente que irá aprender e controlar o equipamento, onde se encontram dados necessários para o agente decidir, com as várias temperaturas ao longo do tanque do termoacumulador e o tempo em questão num espaço temporal de 15 minutos.

Foi realizada uma simulação com cinquenta sensores de temperatura ao longo de um termoacumulador de 200 litros e 2,36 kW. O intervalo de temperaturas permitido foi de mínima 45°C e máxima de 65°C. De forma a assegurar o conforto e segurança, é usado um controlador auxiliar para ligar quando a carga for abaixo de 25%, ou seja, quando a energia contida no termoacumulador for menor que 25% da energia total possível. Este controlador ao ligar força o equipamento a ligar e aquecer para se manter uma reserva de forma a salvaguardar o conforto dos utilizadores. Esta simulação inicial serviu para encontrar uma representação do termoacumulador mais precisa com a ajuda de uma rede neuronal *autoencoder*, que serve para mapear o vetor de estado com maior dimensão, neste caso de cinquenta sensores de temperatura, para uma dimensão menor de cinco valores. O período de aprendizagem foi de 100 dias usando a estratégia de exploração de Boltzman, que define a probabilidade das ações durante a aprendizagem.

A segunda simulação já foi comparada com o funcionamento normal do equipamento reduzindo os custos em 24% num dia. Posteriormente realizou-se uma experiência em laboratório com 8

sensores colocados ao longo da altura do tanque, onde existe um Arduino com uma interface JSON/RPC 2.0 para comunicar com o computador onde esteve o agente que aprendeu e controlou num programa desenvolvido na linguagem de programação Python e Scikit-learn, com 10 dias de exploração.

Excluindo os 10 dias de exploração iniciais, este controlo conseguiu uma redução de 28% nos 30 dias seguintes em simulação, e em laboratório 15% durante 40 dias de operação, obtendo um controlo otimizado passado 20 dias de operação, como demonstra a Figura 2.6.

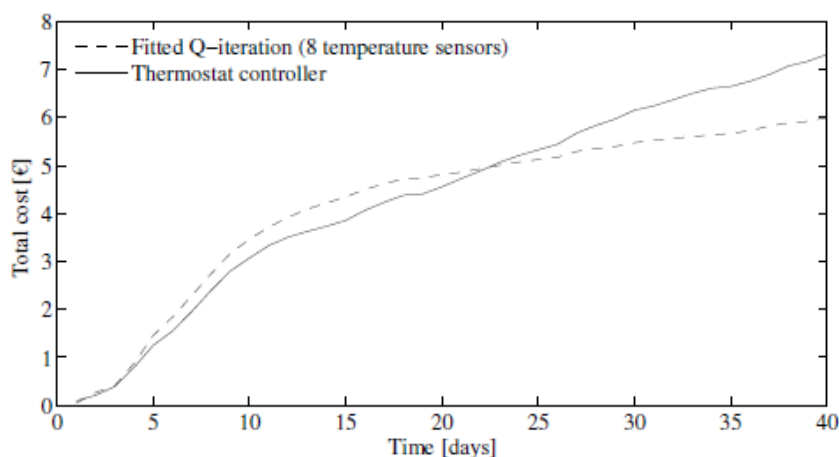


Figura 2.6 – Comparação do controlo a partir do Q-learning com o controlo por termostato. [19]

O estudo de Jigar J. Shah et al. [20] usou os padrões de consumo dos utilizadores e o armazenamento de energia térmica dos termoacumuladores para responder a variações dos custos de energia elétrica. O modelo térmico é de temperatura completamente misturada dentro do tanque. Uma particularidade deste modelo reside no facto de utilizar um coeficiente de performance representando a eficiência do equipamento, com a ideia de que este valor já viesse fornecido a partir da fábrica do termoacumulador.

Com os dados fornecidos pelo modelo térmico e com a potência média do equipamento foi possível calcular o consumo no mesmo instante de tempo já considerando uma válvula de mistura a jusante, dando assim um perfil de consumo de água quente. Este método assume que já se conhecia o perfil de consumo de água quente para o dia seguinte. Após o utilizador fornecer dados como a temperatura máxima e mínima, o algoritmo, baseado numa função objetivo, que controlou o equipamento iterativamente de forma a que todas as restrições sejam cumpridas, criando o seu perfil de funcionamento otimizado.

Na simulação usou-se um perfil que teve de ser escalado para as 24 horas, de uma outra investigação do consumo de 112 casas dos Estados Unidos da América. Foi assumido um termoacumulador de 4,5 kW e com uma capacidade de 171 litros, perdas globais de 118,6 J/h*°C e um COP de 0,91. O perfil de consumo usado é de um estudo realizado a 120 casas que posteriormente foi escalado para obedecer aos 242 litros de água por dia a 57°C, estipulados por uma norma Americana.

Usando uma tarifa tri-horária da General Electric, obteve-se uma redução de 32,7% dos custos face ao funcionamento normal com as gamas de temperatura: temperatura máxima de 82°C e mínima de 48°C.

2.2.2. Otimização do autoconsumo de energia solar

M. Heleno et al [21] propõem um sistema de gestão de energia de um edifício capaz de controlar o funcionamento do termoacumulador com o objetivo de otimizar o autoconsumo de uma instalação fotovoltaica. O modelo térmico proposto pelos investigadores para estimar a temperatura no interior do termoacumulador é um modelo de temperatura constante ao longo do tanque. Foi usado um método de cálculo automático dos parâmetros físicos do termoacumulador, nomeadamente a sua capacidade térmica e o coeficiente de perdas. A partir de quatro leituras de temperatura durante o funcionamento normal do equipamento, duas durante o período de aquecimento e duas durante o arrefecimento, é permitido calcular os parâmetros de modo a possibilitar que sejam usados modelos diferentes de termoacumuladores.

A produção solar da instalação é prevista a partir de dados meteorológicos, é usado um perfil de consumo de água quente já definido (i.e.: utilização de 35 litros de água quente a 38°C nas horas: 7:45, 17:45, 21:15), a temperatura ambiente sempre mantida a 20°C e a entrada de água fria a 16,9°C. O utilizador escolhe a temperatura que deseja, pois esta acaba por ser a temperatura mínima do intervalo de temperaturas de funcionamento, sendo a máxima uma restrição de segurança do próprio equipamento. A unidade de controlo otimiza o funcionamento do termoacumulador a partir de programação linear inteira mista (PLIM) para o dia seguinte. Na Figura 2.7 é apresentado o esquema do modelo de gestão de energia desta investigação.

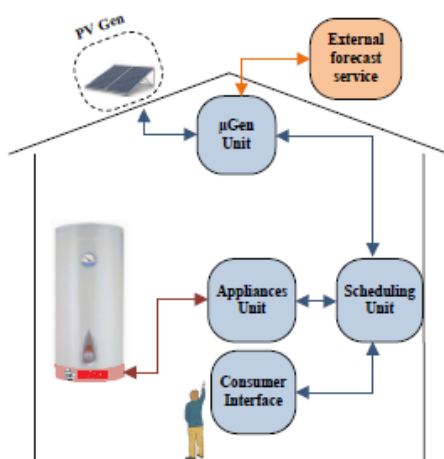


Figura 2.7 – Representação do modelo de gestão de energia do edifício apresentado por M. Heleno et al. [21]

Realizaram uma experiência laboratorial com as condições descritas anteriormente onde o funcionamento do termoacumulador foi deslocado para alturas onde a produção solar fosse maior como por exemplo entre as 11:00 e as 13:00. Foi também validado o modelo térmico com a leitura dos sensores que foram colocados no interior do equipamento.

Concluíram que as perdas térmicas no equipamento são maiores do que o estimado, mas isso não terá impacto no conforto do utilizador e que se conseguiu otimizar o autoconsumo. Ainda realizaram um caso de estudo onde simularam a gestão de 100 termoacumuladores. Na Figura 2.8 são apresentados os resultados do controlo otimizado de apenas um termoacumulador em ambiente laboratorial.

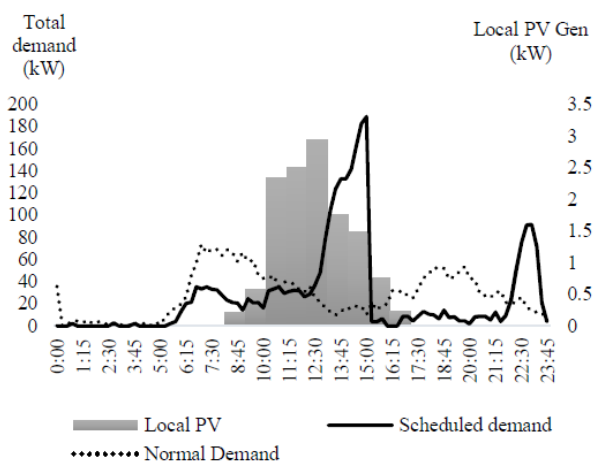


Figura 2.8 – Resultados do controlo otimizado na investigação de M. Heleno et al. [21]

No trabalho de A. Casaleiro et al.[10] são estudados os benefícios económicos de usar um termoacumulador para otimizar o autoconsumo de uma instalação solar e também a potencia ideal do sistema solar. O balanço económico e energético é determinado ao longo do ano usando dados do consumo de energia elétrica do equipamento, consumo de água quente e produção solar que já são conhecidos, com uma resolução temporal de uma hora. O estudo é simulado numa casa típica portuguesa, onde foram estudados cinco possíveis configurações, que são divididas em dois grupos, um em que não se usam técnicas de DR e recorre-se ao funcionamento normal, outro em que se usam duas técnicas de DR, uma com o controlo a partir de um algoritmo genético e outro a partir de um algoritmo heurístico.

Foram introduzidos dois conceitos, a fração solar que é a percentagem de energia solar consumida num determinado tempo, e o custo de energia nivelado que é a razão entre a soma dos custos de energia e investimento sobre a energia consumida, possibilitando a comparação económica das cinco configurações.

Dentro do grupo de configurações de estudo, que não usam técnicas de DR, foram testadas três: a configuração A1 que usou um esquentador a gás natural e todo o resto do consumo elétrico foi fornecido pelo sistema solar e a rede elétrica; a configuração A2 que usou a mesma configuração A1, mas foi adicionado um banco de baterias elétricas para armazenar a energia solar; a configuração B1 que em vez de ser um esquentador a gás natural foi apenas um termoacumulador sem o banco de baterias. Dentro do grupo de configurações de estudo que usam técnicas DR foram testadas duas: a configuração B2 em que o funcionamento do termoacumulador é otimizado a partir de um algoritmo genético, com o objetivo de armazenar apenas a energia necessária para satisfazer o consumo de água quente; e a configuração B3 onde foi otimizado por um algoritmo heurístico, com o objetivo de aumentar sempre a energia armazenada no termoacumulador.

A casa simulada tem três habitantes, dois adultos e uma criança. Segundo a investigação e baseando-se num regulamento de Portugal, o consumo de água quente por pessoa é de 40 litros por dia, logo são no total 120 litros por dia consumos e este consumo é distribuído ao longo do dia de forma a estabelecer um perfil de consumo horário. Esse perfil não foi muito detalhado, não podendo saber realmente os períodos em que ocorrem o consumo de água quente.

A remuneração da energia vendida á rede segue a legislação portuguesa, Decreto de lei nº 153/2014 de 20 de outubro, onde é vendida 90% da energia mensal injetada na rede ao preço médio do Mercado Ibérico (OMIE) de 2015, que dá uma média de 5 cEUR/kWh. Foi considerado um termoacumulador de 150 litros com uma gama de temperaturas [50,60] °C e um esquentador a gás natural, que aqueceu a água quase instantaneamente dos 15°C aos 50°C.

Realizando a simulação, e usando tarifas simples com um custo de 0,1634 EUR/kWh e uma tarifa bi-horária de 0,1002 EUR/kWh no período de vazio e 0,1909 no período fora do vazio (das 8:00 às 20:00), concluiu-se que ambas as configurações B2 e B3 tiveram bons desempenhos. Durante uma tarifa simples o custo nivelado de energia é bastante similar até á potência de instalação solar de 1,25 kWp, a partir dessa potência o algoritmo heurístico começa a ter melhores valores como representado na Figura 2.9.

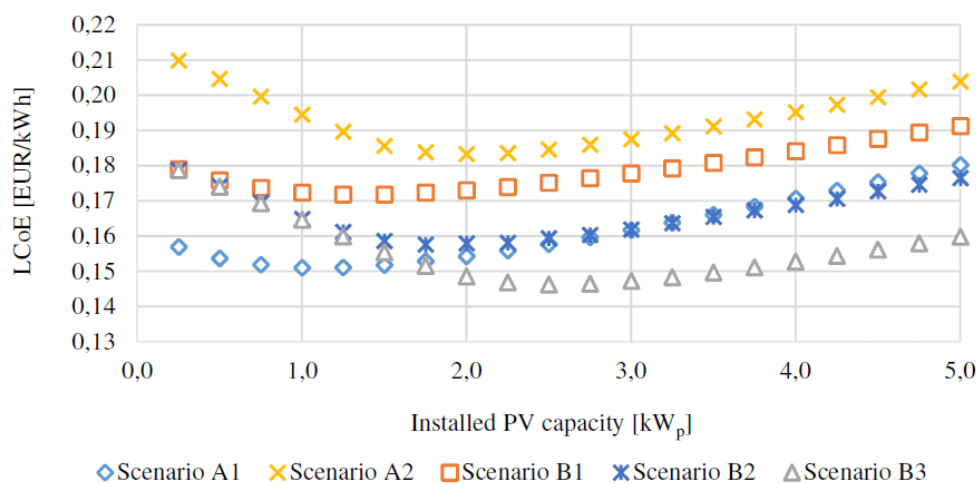


Figura 2.9 – Custo nivelado de energia das diferentes configurações e potências da instalação solar numa tarifa simples. [10]

Na tarifa bi-horária essa diferença não foi tão grande, pois o algoritmo genético é sensível a variações de preço enquanto o heurístico não, como demonstra a Figura 2.10.

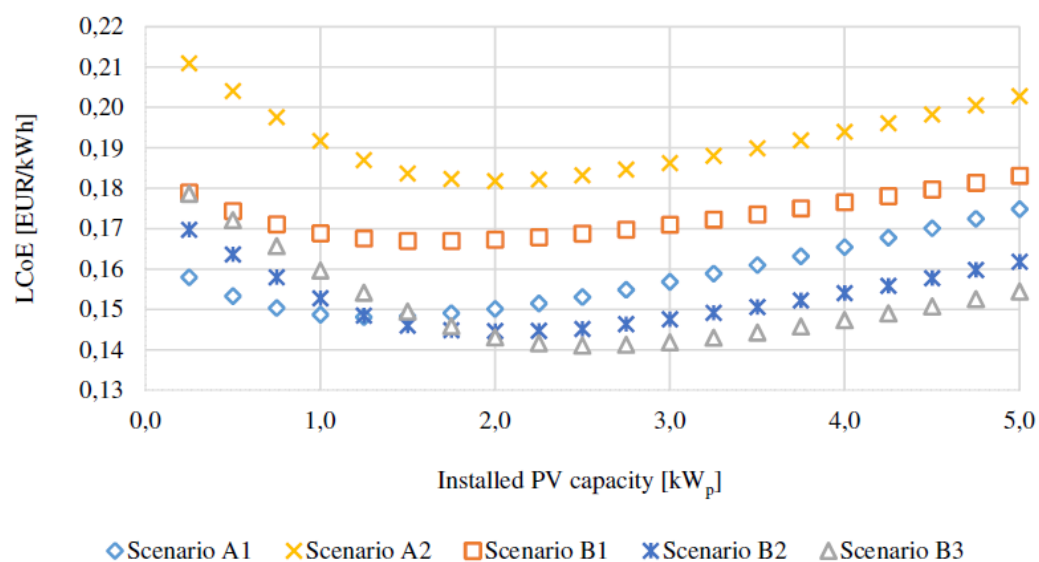


Figura 2.10 – Custo nivelado de energia das diferentes configurações e potências de instalação solar numa tarifa bi-horária. [10]

No final, a configuração com maior autoconsumo foi a B3, com 56,9% de fração solar como representado na Figura 2.11. E a melhor gama de potências de instalação solar a nível económico é entre 1 kWp e os 2,5 kWp.

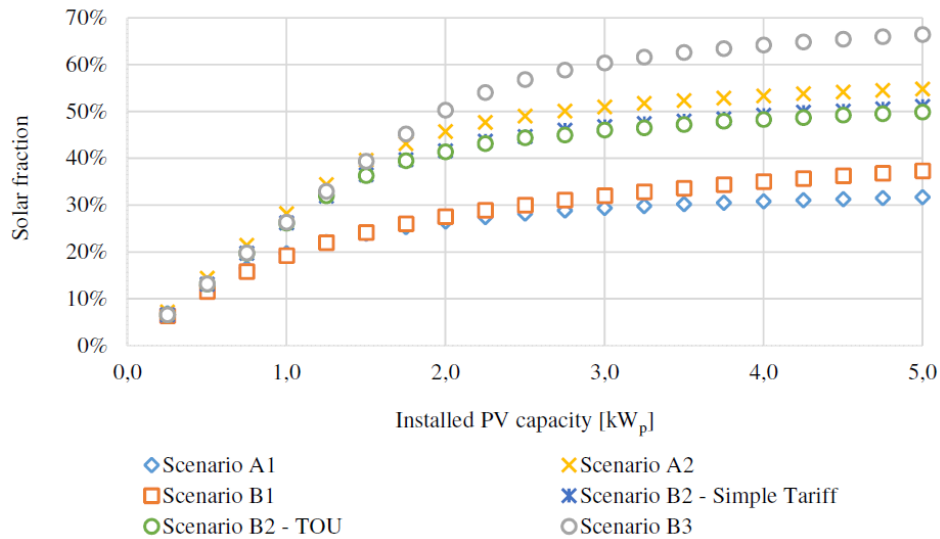


Figura 2.11 – Fração solar das várias configurações. [10]

2.2.3. Otimização do autoconsumo de energia eólica

No estudo de Pourmousavi S. A. et al.[22] foram usados termoacumuladores agregados para o deslocamento de cargas, por forma a armazenar energia em alturas em que a produção eólica é elevada, de forma a aumentar o autoconsumo eólico e desviar o pico de consumo. O objetivo não foi só otimizar o autoconsumo de energia eólica, mas também a redução de custos mantendo na mesma as condições de conforto para o utilizador.

Foram usados no total 1000 termoacumuladores, sendo a experiência realizada toda em simulação de forma a ter em consideração o que acontece na realidade. Dos 1000 termoacumuladores criaram uma distribuição normal aleatória de forma a haver variabilidade das características de cada equipamento, mas os parâmetros como a temperatura de entrada da água, temperatura ambiente, as potências médias dos equipamentos e as gamas de temperaturas de funcionamento foram iguais. Cada termoacumulador teve um modelo térmico em que a temperatura no interior do equipamento é uniforme ao longo do tanque. O preço foi determinado pela tarifa de energia bi-horária e foi considerada uma variável implementada pelo utilizador.

Foi visto que o perfil médio da procura de energia criada pelo termoacumulador seguiu o mesmo perfil médio da procura de energia total de uma casa, quer nos dias de semana ou nos dias de fim de semana. Foi criado o perfil do consumo de água quente adaptando a curva dos consumos totais médios de uma casa, tanto para o dia da semana como fim de semana, a partir de um parâmetro K que foi a quantidade de água quente produzida por um kWh energia elétrica de uma certa temperatura inicial até uma temperatura específica (*setpoint*) durante um intervalo de tempo de uma hora, desprezando as perdas por convecção. Foi possível determinar o caudal de água

quente extraída do equipamento multiplicando o perfil de procura de energia elétrica do termoacumulador pelo parâmetro K.

Um dos controlos é feito a partir de um sinal designado por “inc/dec” que diz se é necessário aumentar ou diminuir as reservas de energia, neste caso, água quente no tanque do termoacumulador, dependendo se a produção está a exceder o consumo ou o inverso. Neste trabalho foi usado este sinal que é gerado pelos fornecedores de energia (*Bonneville Power Administration*) em cada intervalo de trinta segundos. Esta companhia também forneceu dados em relação à produção de energia eólica.

Cada termoacumulador começou com estado aleatório e o algoritmo realizou o controlo conforme os sinais obtidos sobre a produção eólica, preços de energia e fornecedores de energia elétrica. Foram estudados cinco casos: o primeiro caso serviu de comparação, onde não teve nenhum controlo, numa gama de temperaturas [48°C – 54°C]; um segundo caso designado de “case1” em que o objetivo é apenas balancear as reservas de energia a partir do sinal “inc/dec” com um intervalo de temperaturas [46°C; 72°C]; o terceiro caso designado por “case2A” em que foi controlado apenas pela tarifa bi-horária [46°C ; 54°C]) no quarto caso designado por “case2B” foi controlado pela tarifa bi-horária mas com um intervalo diferente ao caso anterior [46°C; 72°C]; por fim, o caso “case3” onde se controlou a partir de ambos, o sinal e a tarifa num intervalo de [46°C; 72°C].

Considerando todos os objetivos, o controlo que conseguiu uma melhor redução de custo, redução do pico de consumo, menor energia consumida e melhor conforto para o utilizador foi o “case3” com uma redução de custos de 44,6% em comparação com o normal. A carga total ligada ao mesmo tempo foi a mesma que se os 1000 fossem controlados pelo termostato e consumos de energia total ligeiramente mais altos que o padrão.

Na investigação de N. Fitzgerald et al. [23], foi feita a integração de energia eólica a partir do controlo de um termoacumulador inteligente de forma a conseguir benefícios para a rede e para o utilizador. O modelo térmico usado é simples, tendo em consideração todas as perdas por transmissão de calor e admitindo que a temperatura é uniforme ao longo do tanque (1 elemento de aquecimento). Segundo os autores, o controlo foi feito por algoritmos simples designados por controlos de cargas diretos, em que irá ligar ou desligar o equipamento conforme as variáveis de controlo, que neste estudo foram os dados do mercado de energia e produção eólica.

O perfil de consumo considerado foi muito específico, apresentado na Figura 2.12, com consumos de manhã e ao final da tarde/noite. Existe um parâmetro que é completamente aleatório, o próprio tempo de consumo naquele certo instante, totalizando ao final do dia 200 litros de água quente consumidos. Todos os dados como a variação do preço de energia e o fornecimento de energia eólica foram de empresas locais na Irlanda e todos os resultados obtidos foram de simulações com a duração de um ano.

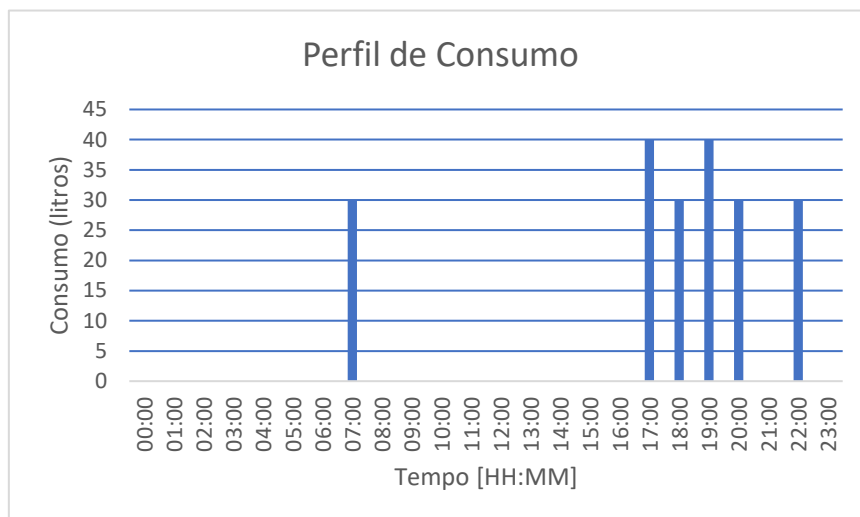


Figura 2.12 – Perfil de consumo de água quente usado na investigação de N. Fitzgerald et al. [23]

Foi usado o funcionamento convencional do termoacumulador como controlo de comparação, com temperatura máxima de 70°C e mínima de 68°C. Foram realizados mais quatro estudos com parâmetros diferentes, variando os modelos do equipamento, o coeficiente global de transmissão de calor e o volume do tanque para cada controlo.

Realizaram-se quatro tipos de controlo onde o primeiro fez-se o controlo da temperatura admissível no interior do tanque a partir da procura da rede elétrica, com o objetivo de deslocar o funcionamento para alturas de que não tenham elevados consumos. O segundo foi a otimização da energia eólica determinando, para cada intervalo, uma temperatura admissível dependente da energia eólica gerada. Depois foi a otimização a partir da penetração de energia eólica no consumo da casa onde a penetração é a percentagem de energia eólica naquele preciso instante. Por fim, é feito controlo dependendo apenas pelo preço instantâneo. Obtiveram os resultados apresentados na Figura 2.13.

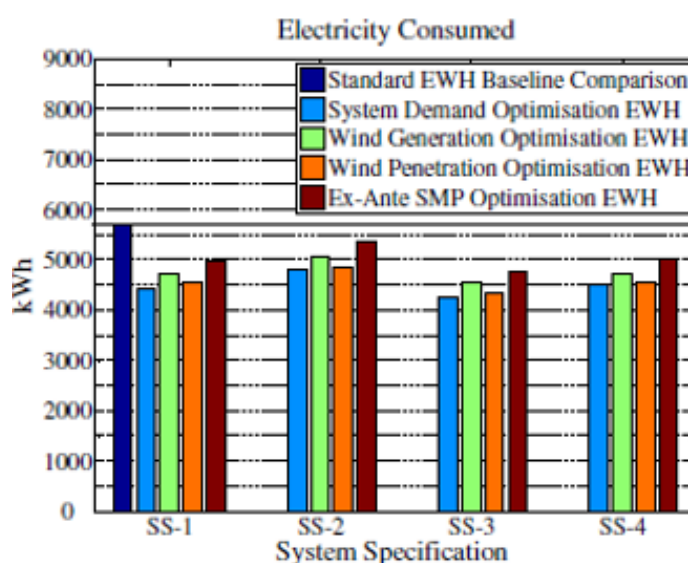


Figura 2.13 – Resultados obtidos no trabalho de N. Fitzgerald et al. [23]

O melhor controlo foi o primeiro, onde se usou a procura da rede elétrica, obtendo uma redução de 25% dos custos em comparação com o funcionamento padrão. Descobriu-se também que se aumentar o isolamento térmico de $0,8 \frac{W}{m^2} \times ^\circ C$ para 0,44 obtém-se uma redução de 3% para 8% e se for aumentado o volume do tanque, maior será o consumo, pois terá mais quantidade de água para aquecer.

2.3. Discussão

Existe uma grande variedade de metodologias para a utilização da flexibilidade energética e ao mesmo tempo trazer benefícios para os utilizadores, dependendo de objetivos específicos. Uma boa parte das soluções propostas, são soluções bastante exigentes computacionalmente e não existe uma certeza da possibilidade de implementar em controladores reais, como é o caso do trabalho [13], onde foram usados controlos por *machine learning*. Existe outro trabalho [19], em que é mostrada a implementação de *machine learning* em condições laboratoriais, acabando por ser uma metodologia pesada para ter uma aplicação direta a nível doméstico, pois necessita de um computador para processar todo o seu funcionamento.

Mas também existem investigações que resolveram o problema por soluções menos pesadas. Contudo, foram realizadas por simulação e não existe um estudo em condições reais para as fundamentar. Todas as metodologias demonstraram que o termoacumulador tem um grande potencial para a redução de custos e otimização de autoconsumo de energias solar e eólica, mas a maioria das investigações tiveram como base simulações, onde apenas duas das encontradas [19] e [21], realmente realizaram estudos laboratoriais, como resumido na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resumo da Revisão de Literatura.

Autores da Investigação	Implementação em Simulação	Implementação em Laboratório
P. Du e N. LU [12]	X	
K. Al-Jabery et al. [13]	X	
Z. Chen et al. [14]	X	
P. Kepplinger et al. [15]	X	
V. Kapsallis et al. [16]	X	
B. Lin et al. [17]	X	
Q. Wu et al. [18]	X	
F. Ruelens et al. [19]	X	X
Jigar J. Shah et al. [20]	X	
M. Heleno et al. [21]		X
A. Casaleiro et al. [10]	X	
Pourmousavi S. A. et al. [22]	X	
N. Fitzgerald et al. [23]	X	

Posto isto, é proposto um sistema, designado por *EFsyst*, desenvolvido de acordo com uma abordagem modelar, para o estudo da flexibilidade energética disponibilizada por sistemas de aquecimento e armazenamento de AQS. Este sistema possibilitará investigar vários algoritmos de controlo que possam vir a ser possíveis de implementar em sistemas de gestão de energia domésticos reais.

Capítulo 3 – Solução Proposta

Este capítulo apresenta a solução proposta para o problema identificado no capítulo 2. Para tal, é proposto um sistema, designado por *EFsyst*, com uma arquitetura modular onde cada módulo tem a sua função distinta e pode ser adaptado de acordo com diferentes especificações. Assim, concretamente, a Secção 3.1 apresenta a arquitetura do sistema desenvolvido e os respetivos módulos, enquanto que a Secção 3.2 descreve a implementação do sistema considerando a utilização da flexibilidade energética disponibilizada por um termoacumulador.

3.1. Arquitetura do Sistema

O *EFsyst* tem como principal objetivo suportar o desenvolvimento de métodos de DR que exploram a flexibilidade energética de sistemas de aquecimento e armazenamento de AQS. Mais concretamente, o *EFsyst* permite a validação de métodos de DR em contexto real e considerando os desafios inerentes a diferentes condicionantes que normalmente não são modeladas em ambientes de simulação (e.g. tempos de comunicação variáveis). Além disso, o *EFsyst* permite que diferentes utilizadores controlem remotamente o mesmo dispositivo elétrico que disponibiliza a flexibilidade energética, possibilitando, assim, uma melhor partilha de recursos. No entanto é importante notar que apenas um utilizador pode interagir com o *EFsyst* em cada instante.

A arquitetura do *EFsyst*, apresentada na Figura 3.1, segue uma abordagem modular com o objetivo de permitir a implementação de cada componente de acordo com as tecnologias disponíveis. Tal como apresentado nesta figura, o *EFsyst* é constituído pelos seguintes módulos funcionais:

- módulo de monitorização e atuação (MMA);
- módulo de armazenamento de dados (MAD);
- módulo interface (MI); e
- módulo de controlo do consumo de Água Quente Sanitária (MCCAQS).

De um modo geral, o MMA realiza a aquisição de dados em tempo real e envia-os para serem armazenados no MAD. A partir do MI, a Unidade de Controlo Remoto (UCR) obtém os dados previamente armazenados e envia os sinais de controlo de acordo com o método de DR em avaliação que, por sua vez, são lidos pelo MMA para ligar ou desligar o sistema que disponibiliza a flexibilidade energética. Além disso, a UCR também estabelece o perfil de consumo de AQS desejado. As próximas subsecções descrevem detalhadamente cada um destes quatro módulos, bem como a interação da UCR com o *EFsyst*.

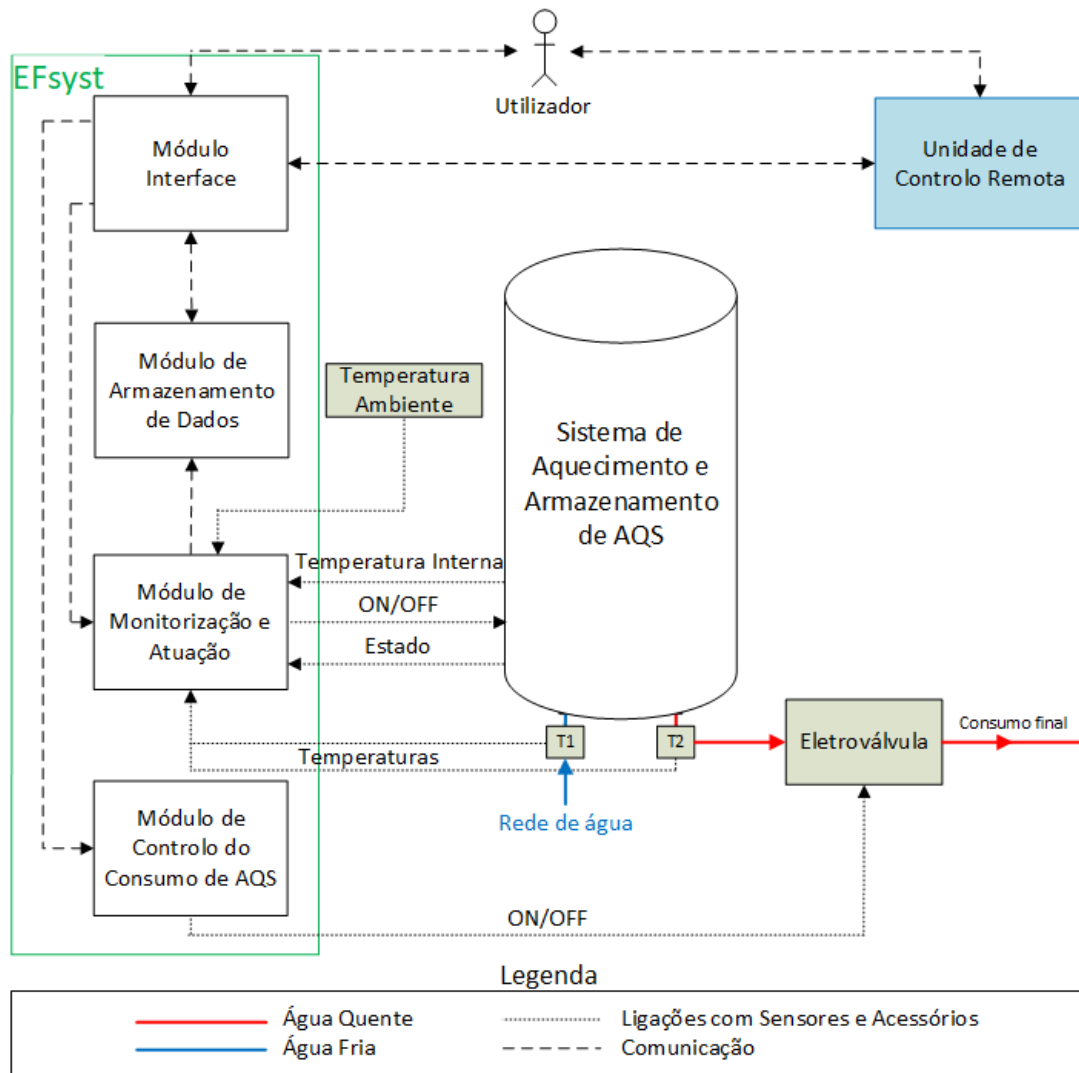


Figura 3.1 – Arquitetura do EFsyst.

3.1.1. Módulo de Monitorização e Atuação

Com o objetivo de estudar a flexibilidade energética em sistemas de aquecimento e armazenamento de AQS, é necessário obter as variáveis necessárias para avaliar o comportamento destes sistemas. Segundo Kalogirou A. S. [24], o comportamento térmico de sistemas de aquecimento e armazenamento de AQS pode ser descrito pela seguinte equação:

$$T_{\text{int}-n} = T_{\text{int}} + \frac{\Delta t}{M_{\text{cp}}} [Q_u - Q_l - UA(T_{\text{int}} - T_{\text{amb}})], \text{ onde} \quad (1)$$

T_{int-n} – Temperatura interna no tanque após o intervalo de tempo Δt [°C];

T_{int} – Temperatura interna no tanque [°C];

Δt – Resolução temporal;

M – Massa de água presente no tanque [kg];

cp – Calor específico da água a pressão constante $\left[\frac{kJ}{kg} * ^\circ C\right]$;

Q_u – Potência do sistema de aquecimento e armazenamento [W] ;

Q_l – Fluxo de energia extraída do sistema (consumo de água quente)[W];

UA – Coeficiente de perdas de calor $\left[\frac{W}{^\circ C}\right]$;

T_{amb} – Temperatura do ambiente onde se encontra o sistema [°C];

Segundo a Equação 1, para se estudar o comportamento deste tipo de sistemas é necessário saber a temperatura dentro do tanque, a temperatura exterior ao tanque (temperatura ambiente), a temperatura de saída do tanque, representada por T2 na Figura 3.1, a temperatura de entrada, representada por T1 na Figura 3.1, e o estado do elemento de aquecimento (i.e. se está ligado ou desligado). A temperatura dentro do tanque é a variável que será controlada em função do estado do elemento de aquecimento. A temperatura de saída serve para saber o fluxo de energia extraída do sistema e também tem influência no conforto do utilizador, pois este deverá definir os limites de temperatura desejados (i.e. temperatura máxima e mínima). A temperatura ambiente serve para determinar as perdas de energia do interior do tanque para o exterior. A temperatura de entrada influencia a temperatura interna quando ocorre o consumo de água quente. O estado do sistema diz se o sistema se encontra ligado ou desligado, de forma a saber o fluxo de energia que é fornecida à água dentro do reservatório.

Posto isto, o módulo MMA contém sensores que são lidos de forma a obter o valor das variáveis descritas anteriormente numa resolução temporal definida de acordo com as necessidades de utilização (e.g. no caso de estudo apresentado neste documento utilizou-se uma resolução temporal de 5 minutos). Neste trabalho, o MMA obtém estes dados a partir de cinco sensores, estando quatro deles associados à aquisição dos valores referentes às temperaturas necessárias e o quinto ao estado do elemento de aquecimento, e armazena os respetivos dados no MAD. Adicionalmente, o MMA é responsável por aplicar as ações de controlo impostas pela UCR em tempo real, utilizando o MI para as receber. No nível físico, o MMA atua no fornecimento de energia elétrica ao elemento de aquecimento de acordo com as instruções recebidas.

3.1.2. Módulo de Armazenamento de Dados

Tal como o nome indica, o MAD é responsável pelo armazenamento de todos os dados recolhidos ao longo do tempo. Estes dados suportam não só a operação em tempo real da UCR, mas também a posterior análise de resultados para avaliação dos métodos de DR em questão por parte do utilizador. Deste modo, durante o seu funcionamento, o módulo MAD interage com os módulos MMA e MI.

3.1.3. Módulo Interface

O MI tem como principal objetivo garantir a interação do *EFsyst* com a UCR e com o utilizador. Relativamente ao primeiro, o MI permite o acesso aos dados armazenados no MAD, bem como o envio das instruções de controlo para o elemento de aquecimento e a definição do perfil de consumo de AQS. Em relação ao utilizador, o MI permite a visualização e extração de todos os dados recolhidos ao longo do tempo através de uma interface gráfica.

3.1.4. Módulo de Controlo do Consumo de Águas Quentes Sanitárias

Este módulo permite a definição do perfil de consumo de AQS por parte da UCR, recebendo em cada instante o valor do referido consumo através do MI. No nível físico, este módulo é composto por um microcontrolador capaz de comunicar com o MI e por uma electroválvula que controla a saída de água quente. A electroválvula poderá ter apenas dois estados de funcionamento (i.e. aberta ou fechada) ou então poderá permitir diferentes caudais de saída.

3.1.5. Unidade de Controlo Remoto

Utilizando o MI do *EFsyst*, a UCR controla o funcionamento do dispositivo de aquecimento e armazenamento de AQS que disponibiliza a flexibilidade energética de acordo com o método de DR em estudo. O utilizador é assim responsável pelo desenvolvimento da UCR e por assegurar que esta unidade é capaz de comunicar com o *EFsyst* de acordo com as especificações definidas pelo MI e assim ter acesso aos dados armazenados no MAD e atuar no MMA e no MCCAQ.

3.2. Implementação

Esta secção descreve a implementação do *EFsyst* considerando a utilização da flexibilidade energética disponibilizada por um termoacumulador. Embora se pudessem considerar outros tipos de sistema de aquecimento e armazenamento de AQS, o equipamento escolhido é particularmente interessante para o setor residencial e de serviços. Posto isto, a Subsecção 3.3.1 descreve a implementação dos módulos anteriormente apresentados, enquanto que as

Subsecções 3.2.2 e 3.2.3 detalham os componentes utilizados e o desenvolvimento da estrutura de suporte, respetivamente.

3.2.1 Módulos do sistema

Módulo de Monitorização e Atuação

O MMA é constituído principalmente por dois microcontroladores, um que realiza o levantamento de dados e atuação no elemento de aquecimento e outro que comunica com o MAD. De modo a realizar o levantamento das variáveis necessárias e descritas anteriormente e a referida atuação, o MMA recorre a um microcontrolador Arduino Uno Rev3 [25], quatro sensores de temperatura, um sensor que permite aferir o estado do elemento de aquecimento e um relê que permite controlar o fornecimento de energia elétrica ao elemento de aquecimento. Três destes sensores de temperatura são termístores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), que medem o seguinte: temperatura da água quente armazenada; temperatura da água fria de entrada; e temperatura da água quente de saída. Além destes, utiliza um sensor DHT22, que também se baseia num termistor, para medir a temperatura ambiente onde se encontra o termoacumulador.

O Arduino Uno Rev3 contem dois tipos de portas, analógicas (A0 até A5) e digitais (0 até 13). Para este microcontrolador ler a temperatura a partir de um termistor, é necessário saber o valor da resistência desse termistor. Para tal, utilizou-se um divisor de tensão com uma resistência conhecida de 10 kΩ. A partir deste divisor é possível obter o valor do termistor utilizando a Equação 2 e assumindo que a tensão do Arduino (V_IN) é sempre constante e correspondente a 5V. Na Figura 3.2 é representado o esquema do divisor utilizado para determinar a temperatura de entrada no termoacumulador (T1).

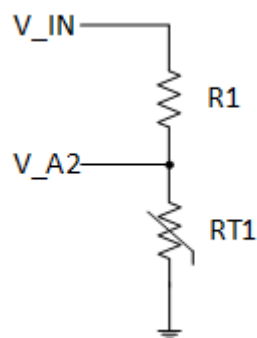


Figura 3.2 – Divisor de tensão utilizado para determinar T1.

$$RT1 = \frac{V_{A2} \times R1}{V_{IN} - V_{A2}} \quad (2)$$

RT1 – Resistência do Termistor correspondente a T1 [Ω];

V_A2 – Tensão lida na porta analógica A2 do Arduino Uno Rev 3;

R1 – Resistência conhecida de 10 k;

V_IN – Tensão do Arduino Uno Rev 3 de 5V;

Sabendo o valor da resistência e a curva característica que relaciona esse valor com a temperatura, é possível determinar a temperatura naquele instante. Todos os sensores de temperatura e o sensor de estado do termoacumulador são lidos desta forma.

O estado do elemento de aquecimento é medido através de um sensor de luminosidade colocado no indicador luminoso do termoacumulador em questão (este indicador está ligado quando o elemento de aquecimento se encontra em funcionamento). O sensor utilizado é um LDR (*Light Dependent Resistor*), cuja resistência varia conforme a luminosidade incidente nele. A partir de testes no local da implementação, foi determinado o valor limite de queda de tensão quando este indicador muda de estado. Quando o valor lido for superior ou inferior ao limite, o microcontrolador vai determinar se o elemento de aquecimento se encontra ligado ou desligado.

Após 30 ciclos de 10 segundos de levantamento das temperaturas e do estado de funcionamento do elemento de aquecimento, o microcontrolador calcula as temperaturas médias durante a resolução temporal de 5 minutos, realiza o tratamento dessas variáveis para o respectivo envio e comunica os mesmos para o microcontrolador responsável pela transmissão para o MAD, passando para o próximo ciclo de leitura. A Figura 3.3 apresenta o fluxograma que descreve o funcionamento deste microcontrolador.

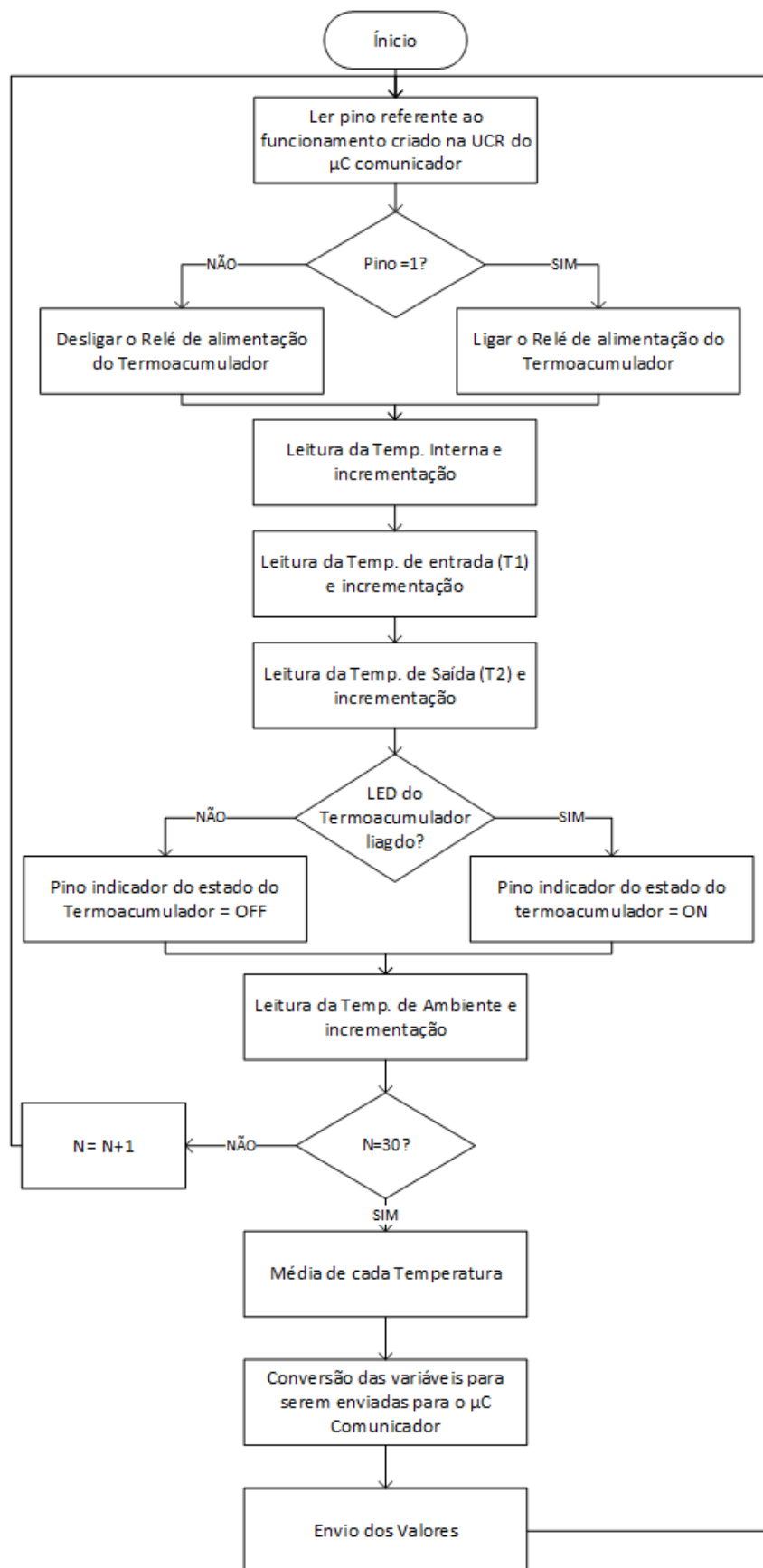


Figura 3.3 – Fluxograma do levantamento dos dados no MMA.

Esta comunicação entre microcontroladores é realizada a partir do protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Optou-se por este protocolo por ser recomendado pelo fabricante do microcontrolador. Os microcontroladores comunicam entre si a partir da ligação entre as portas A4 e A5, representadas na Figura 3.5.

O microcontrolador responsável pela comunicação com o MAD baseia-se também num Arduino Uno Rev3 e recorre a um módulo ESP8266 [26] para enviar os dados utilizando uma rede *WIFI* e baseando-se em pedidos HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*). O envio de dados para o MAD referentes a um determinado ciclo de leituras realiza-se em paralelo com a leitura de dados associados a ciclos posteriores, garantindo assim uma resolução invariante ao longo do tempo.

Após o envio de dados para o MAD, o microcontrolador responsável pela comunicação obtém, através do MI, o estado de funcionamento do elemento de aquecimento imposto pela UCR e comunica tal informação ao microcontrolador responsável pelas leituras e atuação. Esse microcontrolador vai controlar o relé, que ao fechar o circuito, permite o fornecimento de energia elétrica ao termoacumulador. A Figura 3.4 apresenta o fluxograma referente ao microcontrolador responsável pela comunicação com o MAD.

Para interligar o Arduino com o módulo ESP866 é necessário converter os níveis de tensão de 5V do Arduino para os 3.3V recomendados pelo fabricante do módulo. Este conversor converte todas as portas HV (*High-Voltage*), que neste caso são 5V, para as portas LV (*Low-Voltage*) de 3.3V. A comunicação entre eles é realizada a partir do protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). Esta ligação representada na Figura 3.5, corresponde às portas 10 e 11 do Arduino interligado com o ESP8266, que são convertidas e ligadas ao ESP8266 de forma a que a porta programada como TX (porta 10, pino transmissor) no microcontrolador ligue ao RX (pino recetor) do ESP8266 e a porta RX do microcontrolador (porta 11) ligue à porta TX do ESP8266. A Figura 3.5 apresenta o circuito elétrico do MMA.

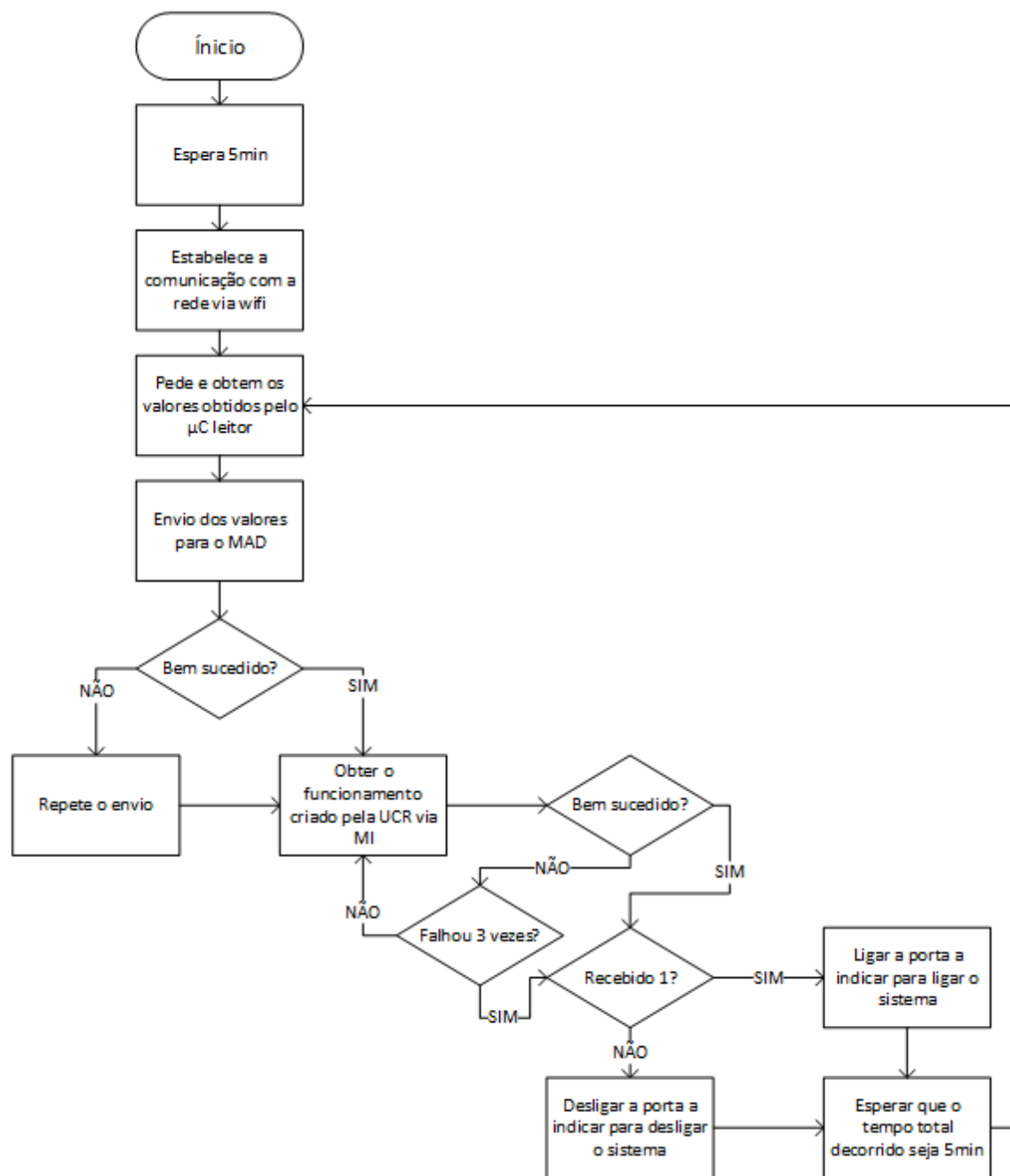


Figura 3.4 – Fluxograma do envio de dados e obtenção do funcionamento realizado pelo MMA.

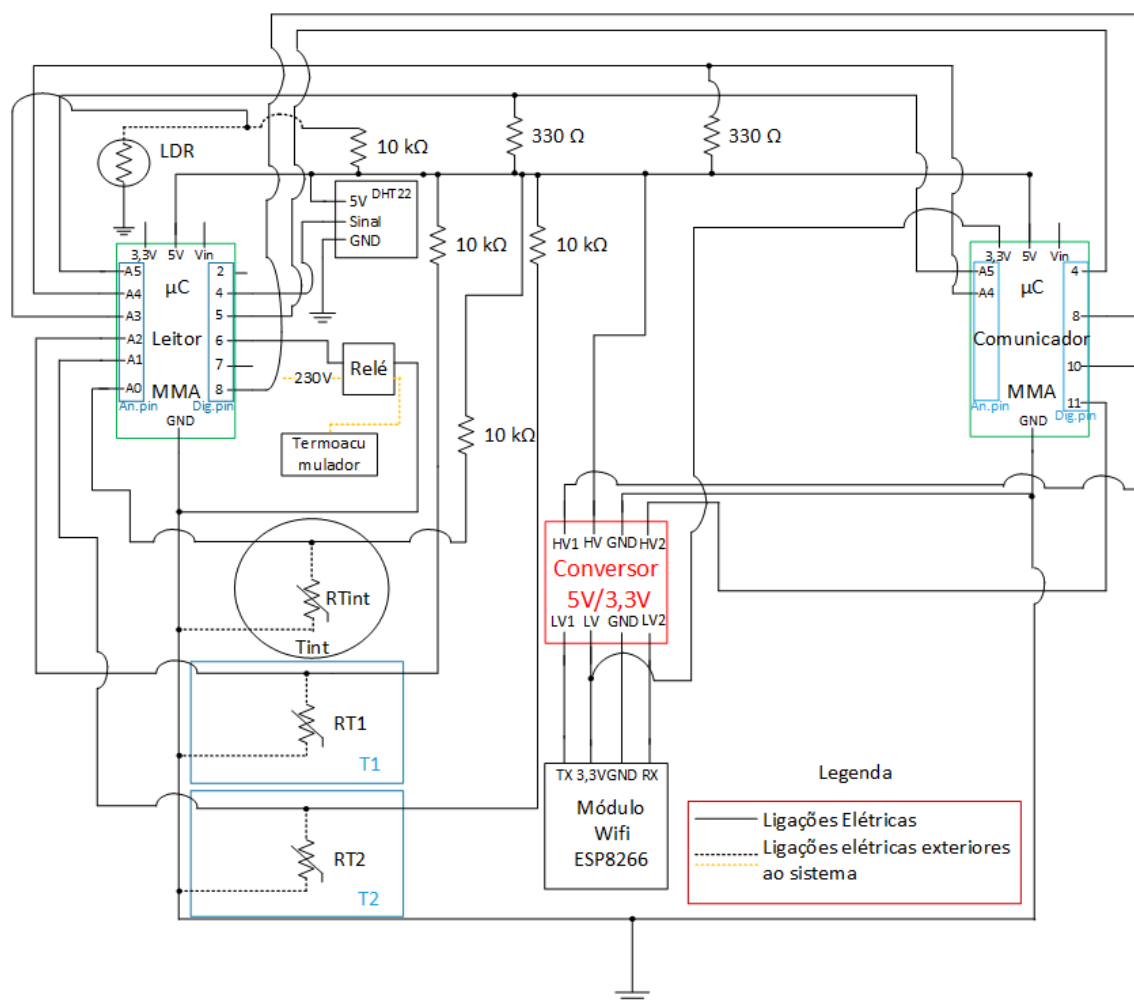


Figura 3.5 – Circuito elétrico do MMA

Módulo de Armazenamento de Dados

As funcionalidades do MAD são asseguradas pela base de dados *online* disponibilizada pela plataforma *ThingSpeak* [26]. Esta plataforma possibilita o armazenamento dos dados do funcionamento do termoacumulador em tempo real obtidos pelo MMA, tais como as temperaturas e o estado do termoacumulador, e ambos o funcionamento do termoacumulador e controlo da electroválvula criados pela UCR. A comunicação entre a base de dados e o MMA é feita a partir do módulo ESP8266, via *WIFI* a partir de pedidos HTTP. Após a criação de uma conta e a configuração de um canal na plataforma é possível comunicar com os oito campos desse canal a partir dos comandos criados pela plataforma. Cada canal desta plataforma tem as suas chaves API (*Application Programming Interface*) que permitem a interação com o servidor da plataforma, uma chave para o envio de dados (*WriteAPIkey*) e outra para a leitura de dados (*ReadAPIkey*). No MMA o microcontrolador responsável pela comunicação usa estes comandos com o auxílio do módulo ESP8266. Após assegurar o sucesso da ligação à rede *WIFI* local os dados são enviados para a plataforma a partir dos comandos disponibilizados. Por exemplo, para enviar um

determinado valor de temperatura para um canal específico e atualizar esse valor num campo desse canal é necessário enviar o seguinte pedido:

“GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=writeAPIkey&fieldx=valordatemperatura”

Onde, “*writeAPIkey*” é a chave API do canal criado na plataforma, “*fieldx*” é o campo de dados que são desejados atualizar e “*valordatemperatura*”, o valor da temperatura desejado enviar para aquele campo específico dentro do canal.

Módulo Interface

Toda a interface necessária para a implementação do EFsyst é garantida pela plataforma *ThingSpeak*. Esta interface possibilita que o MMA leia o funcionamento do termoacumulador criado na UCR e permite que o MCCAQS leia o funcionamento da electroválvula, também criado pela UCR. No caso da leitura de dados, o comando é ligeiramente diferente ao referido anteriormente. Como a plataforma permite que o canal seja privado ou público, o comando é diferente para cada configuração em específico. Se for privado terá de ser usada a chave API correspondente à leitura de dados. Se for público é usado o número de identificação do canal. Por exemplo, para ler o último valor de temperatura num canal público é enviado o seguinte pedido:

“GET <https://api.thingspeak.com/channels/ID/fields/x/last>”

Onde, ID é o número de identificação do canal e “x” o campo onde se encontra o valor desejado obter. Este comando é particularmente utilizado para o MMA ler o funcionamento criado pela UCR em tempo real.

A plataforma *ThingSpeak* também disponibiliza uma interface gráfica que permite a visualização em tempo real dos dados presentes na sua base de dados. Cada vez que é enviado um dado via pedido HTTP, o seu valor é atualizado e associado ao respetivo tempo de chegada, construindo assim uma base de dados que contem os valores e os respetivos tempos de aquisição. A plataforma possibilita a visualização desses dados ao utilizador a partir da sua interface gráfica que se encontra exemplificada na Figura 3.6. Cada ponto presente nos gráficos da Figura 3.6 corresponde ao valor médio adquirido pelo respetivo sensor naquele intervalo de cinco minutos. Estas três variáveis presentes na Figura 3.6 estão armazenadas num canal específico da plataforma *ThingSpeak*, dentro do destinado campo escolhido para cada uma delas. Nesta figura encontram-se exemplificados os gráficos das variáveis: a) temperatura interior do termoacumulador; b) funcionamento do elemento de aquecimento; c) temperatura de entrada no termoacumulador; e d) temperatura de saída no termoacumulador. A partir da plataforma *ThingSpeak*, o utilizador pode também descarregar os dados anteriormente armazenados.

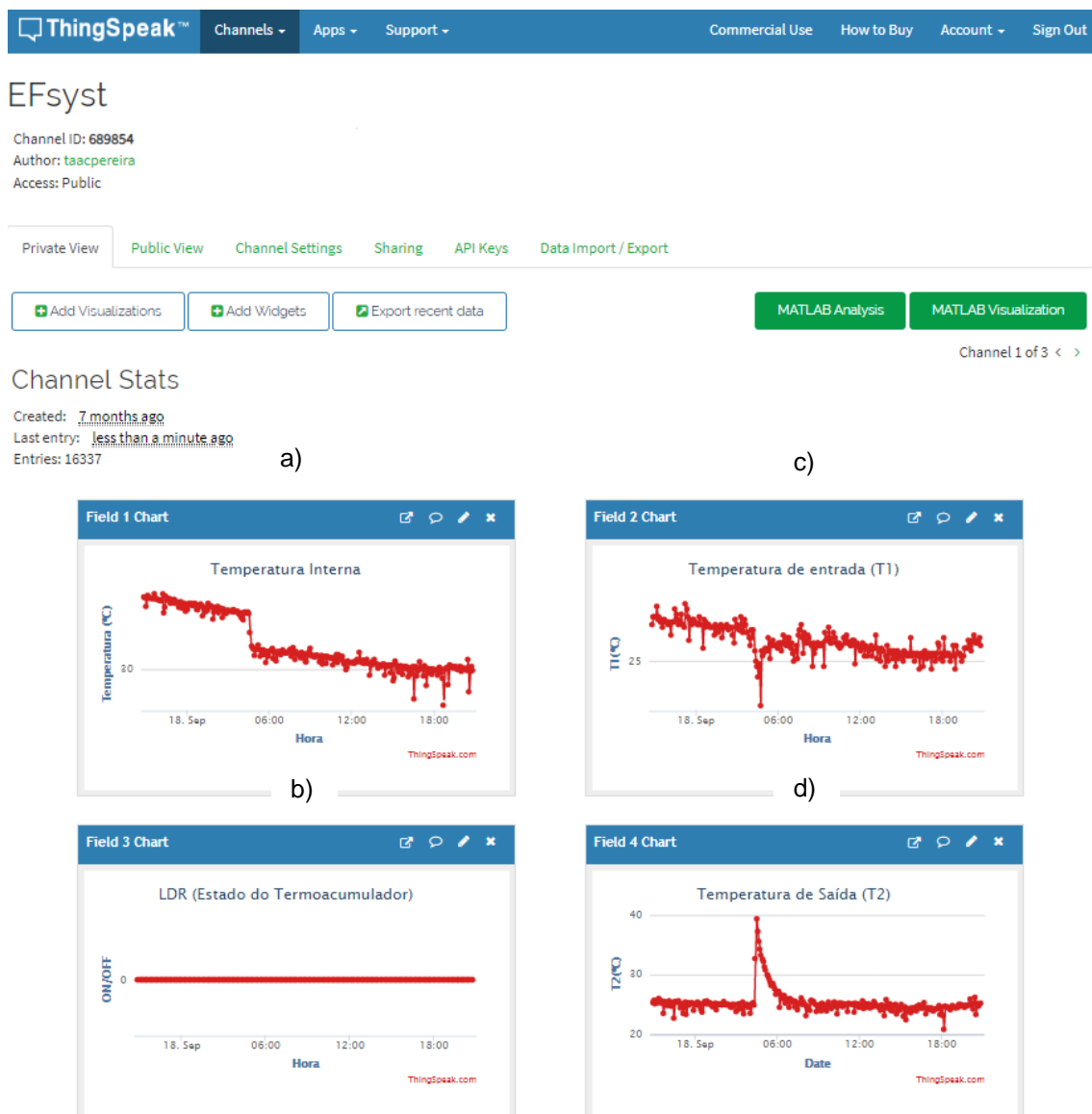


Figura 3.6 – Exemplo dos gráficos apresentados da interface gráfica da Plataforma ThingSpeak.

Módulo de Controlo do Consumo de AQS

As funções deste módulo são executadas por um microcontrolador Arduino Uno Rev3. Este microcontrolador abre e fecha uma electroválvula com o auxílio de um relé. Mantendo o mesmo caudal de saída de água quente, controlando o tempo de abertura é possível criar vários tipos de perfis de controlo dentro dos limites possíveis pelo próprio equipamento e rede fornecedora de água sanitária. A UCR envia para o MAD a partir do MI o controlo da electroválvula numa resolução temporal de um minuto. A cada minuto o microcontrolador recebe essa informação a partir do MI com o auxílio de um módulo ESP8266 e atua em conformidade com esse funcionamento. Na Figura 3.7 é apresentado o circuito elétrico do MCCAQS.

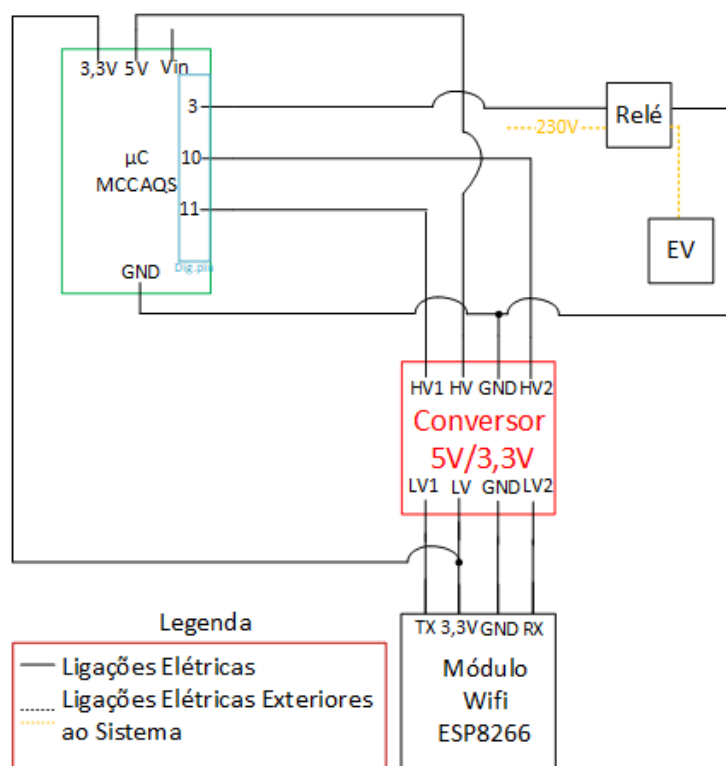


Figura 3.7- Esquema Elétrico do MCCAQS

3.2.2. Lista de Componentes Utilizados

Os componentes utilizados para o desenvolvimento deste protótipo, a sua implementação e o seu preço total encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Lista de Componentes Utilizados.

Tipo de Componente	Nome	Fornecedor	Quantidade	Preço de 2019 (€)
Componente Mecânica [27]	Barras de aço para o suporte de 2m	Leroy Merlin	6	7,29
	Conjunto de 40 parafusos/porca M8	Leroy Merlin	2	7,19
	Conjunto de 30 Anilhas de 10mm	Leroy Merlin	2	2,59
	Viga versátil de 60cm	Leroy Merlin	4	1,89
	Parteleira 60x60cm	Leroy Merlin	1	5,99
	Termoacumulador 100L delta V	Delta	1	109,00
Componente Elétrica [28]	Arduino Uno Rev 3	Arduino	3	20,97
	Caudalimento com sensor de temperatura	Seeed Technology Co., Ltd	3	6,31
	Sensor LDR	Adafruit Industries LLC	1	0,85
	Sensor DHT22	Sparkfun Eletronics	1	8,92
	Conversor lógico bi-direcional 5V / 3.3V	Sparkfun Eletronics	2	2,65
	Módulo Wifi ESP8266	Sparkfun Eletronics	2	6,23
	Solid state relay (relé)	Crydom	2	18,57
Componente Hidráulica [27]	Bichas M/F 150cm 1/2"	Leroy Merlin	3	1,29
	Casquilho M/M 1/2"	Leroy Merlin	3	0,89
	Adaptador F/F 1/2"	Leroy Merlin	2	1,19
	Eletroválvula 1"	Leroy Merlin	1	16,29
	Adptadores para ligação com electroválvula	Leroy Merlin	1	3,99
	Adptador em forma de "T" 1/2"	Leroy Merlin	1	1,99
	Válvula esférica 1/2"	Leroy Merlin	2	2,69
TOTAL:				368,93

3.2.3. Estrutura para o Suporte do Termoacumulador

Com o objetivo de aumentar a liberdade de transporte do sistema desenvolvido, e respetiva utilização em diferentes locais, optou-se pela criação de uma estrutura capaz de suportar o termoacumulador, que não depende das condições de suporte locais. Assim, com o auxílio de um programa de CAD (*Computer Assisted Design*) Solidworks [29], configurou-se a estrutura necessária para suportar o termoacumulador utilizado durante o caso de estudo laboratorial. A Figura 3.8 apresenta a estrutura utilizada na instalação.

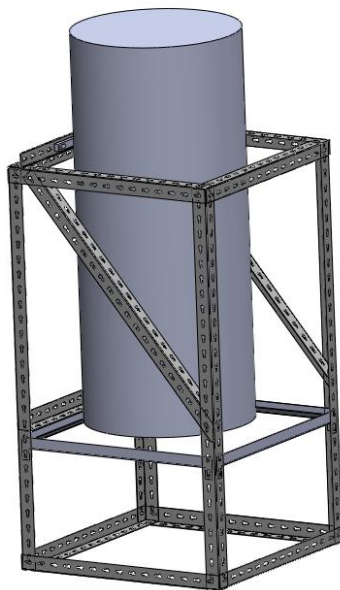


Figura 3.8 – Estrutura de suporte para o Termoacumulador.

3.2.4. Ligações Hidráulicas e seus Componentes

O sistema hidráulico presente na implementação do EFsyst é constituído por dois tipos de ligações: ligação de água quente, representada a vermelho e com o número dois na Figura 3.9 e ligação de água fria, representada a azul e com o número um na Figura 3.9. Neste trabalho, a implementação será realizada num termoacumulador de configuração vertical, onde é fornecida água fria e extraída água quente.

A ligação de água fria fornece água da rede distribuidora local para o termoacumulador. Esta ligação é constituída por três acessórios e três elementos ligantes. Um acessório em forma de “T” para distribuir a água para o lavatório presente no laboratório e para o termoacumulador a ser testado. Uma válvula esférica para cortar o fornecimento de água quando necessário, ou regular o caudal distribuído pela rede local de modo a assegurar que o termoacumulador funciona em segurança. Posteriormente é ligado a válvula ao caudalímetro que se encontra á entrada de água no termoacumulador. O caudalímetro serve de suporte para o sensor de temperatura, que irá ler T1 (temperatura de entrada no termoacumulador) e para este estar em contacto direto com

a água de entrada. Depois deste caudalimento ainda existe uma válvula de segurança que impede que a pressão atinja os 8 bar dentro do tanque do termoacumulador.

A ligação de água quente extrai água quente do termoacumulador para ser utilizada. Esta é constituída por quatro acessórios e dois elementos ligantes. Uma válvula esférica na saída de água quente do termoacumulador para regular o caudal de saída. De seguida é ligada esta válvula ao caudalímetro onde está o sensor de temperatura que irá medir T2 (temperatura de saída do tanque). E depois encontra-se a electroválvula controlada pelo MCCAQ que controla a quantidade de água que vai para o lavatório. Todas as ligações hidráulicas rosçadas são vedadas com linho em conjunto com uma pasta vedante para não haver fugas. Na Figura 3.9 é apresentado o esquema hidráulico da implementação do EFsyst e todos os seus componentes.

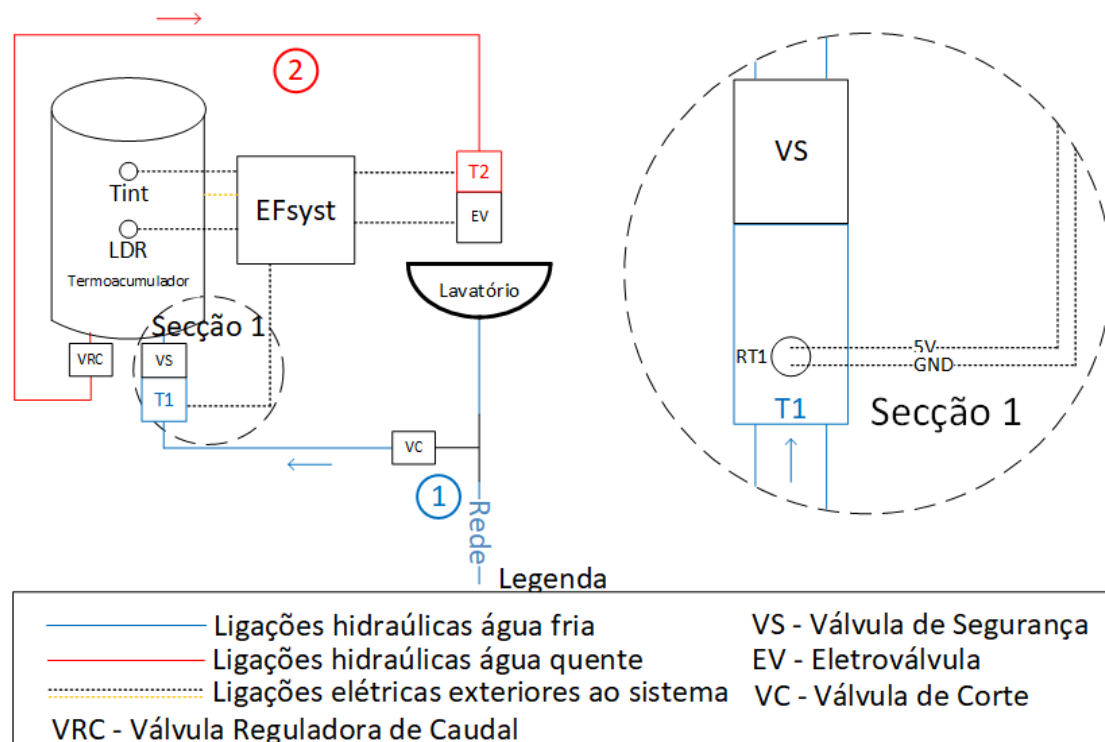


Figura 3.9 – Esquema hidráulico da implementação do EFsyst

Capítulo 4 – Resultados e Análise

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à aplicação do *EFsyst*, descrito no Capítulo 3, a um caso de estudo laboratorial onde a flexibilidade energética disponibilizada por um termoacumulador é estudada. Posto isto, na Secção 4.1 é apresentado o referido caso de estudo enquanto que a Secção 4.2 foca os resultados obtidos.

4.1. Caso de Estudo Laboratorial

De acordo com a implementação descrita na Secção 3.2, o caso de estudo aqui descrito diz respeito ao estudo da flexibilidade energética disponibilizada por um termoacumulador [30] com 100L de capacidade e com apenas um elemento de aquecimento com uma potência de 1,5 kW. Este elemento de aquecimento encontra-se no interior do tanque do termoacumulador, mais precisamente, na sua parte inferior, junto à entrada e saída de água. O termoacumulador em questão encontra-se equipado com um termostato mecânico integrado com o elemento de aquecimento. Por sua vez, o termostato controla o funcionamento do elemento de aquecimento considerando uma determinada gama de temperaturas, que pode ser regulada manualmente conforme a necessidade do utilizador. O funcionamento do elemento de aquecimento é monitorizado pelo MMA do *EFsyst* a partir de um sensor de luminosidade, que verifica se o indicador luminoso do termoacumulador se encontra ligado ou desligado. Para este termoacumulador em concreto foi utilizado este tipo de sensor, embora outros sensores também permitissem a monitorização do funcionamento do elemento de aquecimento (e.g. amperímetro).

Como mencionado na Secção 3.2, neste caso de estudo, o termoacumulador é de configuração vertical, o que significa que a água fria a água quente entram e saem, respetivamente, pela parte inferior do tanque. Quando o elemento de aquecimento se encontra ligado, a água que se encontra na parte inferior, devido à sua localização, irá aquecer e aumentar a sua temperatura. À medida que a temperatura aumenta, o seu volume aumenta devido à dilatação térmica e consequentemente reduz a sua densidade. Por gravidade, ao reduzir a densidade, a água com temperatura mais elevada tende a deslocar-se para a parte superior do tanque, enquanto a água com temperatura mais baixa e mais densa, movimenta-se para a parte inferior do tanque. Este fenómeno de transmissão de calor é designado por convecção. Quando desligado, ocorre a estratificação da temperatura ao longo do tanque do termoacumulador, estando a água mais fria na parte inferior e a mais quente na parte superior. Durante esse período, se não ocorrer consumo de água e se o equipamento permanecer desligado, as várias camadas de água com temperaturas distintas trocam calor com a vizinhança até que toda a água no tanque chegue ao equilíbrio térmico.

Nesta configuração do termoacumulador, o que diferencia a entrada de água fria, da saída de água quente, é o comprimento do tubo no interior do tanque. Na entrada de água, na parte inferior do termoacumulador, é fornecida a água fria; na saída de água quente existe um tubo que

alcança a parte superior do tanque onde está a água com a temperatura mais elevada, permitindo que sempre que exista consumo, apenas a água menos densa (mais quente) seja extraída. Na Figura 4.1 é apresentada a configuração interna esquematizada do termoacumulador estudado.

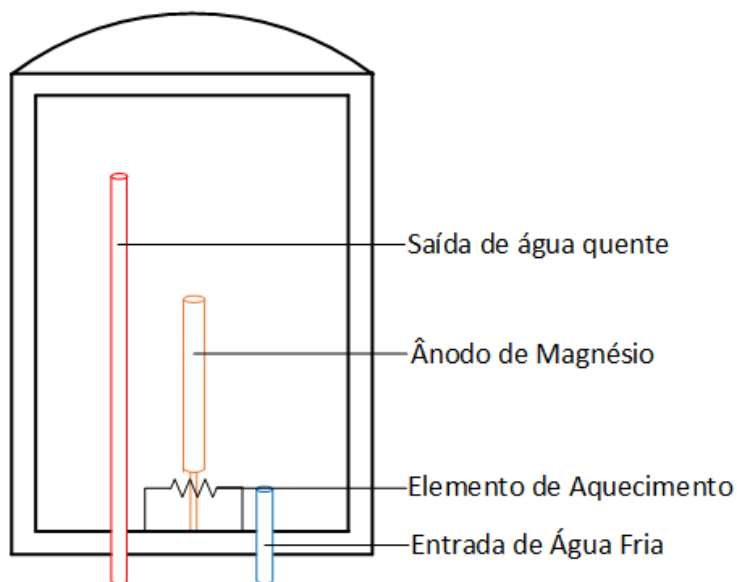


Figura 4.1 – Configuração interna do termoacumulador utilizado

O sensor responsável pela leitura da temperatura interna do termoacumulador foi colocado na parte superior do tanque, onde se encontra a água com a temperatura mais elevada. De modo a não ser necessário realizar alterações no sistema, adotou-se uma implementação não invasiva, colocando o sensor em contacto com a carcaça de aço do tanque dentro da camada de isolamento. A leitura realizada pelo sensor, é indireta e não representa a temperatura real presente dentro do tanque, contudo a variação que a temperatura tem ao longo da experiência, permite estudar o funcionamento do equipamento. Esta variável será uma das variáveis monitorizadas ao longo do caso de estudo.

Considerando os objetivos e motivação apresentados na dissertação, este caso de estudo foca maioritariamente o caso observado em Portugal. Atualmente, em Portugal, o consumidor final está sujeito a aplicação de diferentes tarifas de eletricidade reguladas pela ERSE, a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, e impostas pelas empresas comercializadoras de eletricidade [31]. Assim, a operação do sistema é estudada com as tarifas bi-horária e tri-horária. A tarifa bi-horária é composta por dois períodos, o período de vazio e o período fora do vazio, onde os preços específicos são diferentes. A tarifa tri-horária é composta por três períodos, o período de vazio, período de cheias e período de ponta. No caso de estudo foram aplicados preços simulados numa ferramenta disponibilizada pela EDP Comercial [32], tendo sido obtidos preços específicos para cada tarifa estudada.

Do mesmo modo, foram considerados três cenários distintos. O primeiro cenário, designado por original, considera o funcionamento normal do termoacumulador, que mantém a temperatura interna entre 47 °C e 50 °C. No segundo, designado por T50, o termoacumulador é controlado por regras dentro da sua gama de funcionamento normal. No terceiro cenário, denominado por T55, o termoacumulador também é controlado por regras, mas a temperatura máxima da gama de funcionamento é aumentada para 55 °C.

Em todos os cenários foi considerado um consumo de água quente diário de 40 litros, que corresponde ao consumo médio diário de um consumidor residencial em Portugal [10]. Devido à impossibilidade da implementação de uma válvula/torneira de mistura de água quente com água fria, foi assumindo que os 40 litros de água quente são todos extraídos do termoacumulador. Por simplicidade, considerou-se que a água quente consumida é sempre 40 litros, independentemente da temperatura a que ela se encontra. Relativamente aos períodos de consumo, considerou-se que o consumo dos 40 litros de água quente é realizado num único banho cujo instante de início se faz variar ao longo dos dias em que se realizam as experiências.

Todas as experiências foram realizadas numa sala que se encontra nas instalações do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa [33]. Na Figura 4.2 é apresentada a instalação da experiência laboratorial realizada para desenvolver este caso de estudo.



Figura 4.2 – Montagem associada à experiência laboratorial para a realização do caso de estudo.

4.2. Utilização da Flexibilidade Energética

Nesta secção são explicados os cenários original, T50, T55 e o estudo da influência da hora de consumo de água quente. De seguida, são apresentados os resultados obtidos para cada um dos cenários. Posteriormente, é exposto o tratamento de dados para a obtenção dos custos correspondentes a cada cenário. Por fim, os resultados obtidos são analisados para todos os cenários, primeiro, considerando apenas a variação do consumo de água quente ao longo do dia e, posteriormente, considerando a variação da tarifa bi-horária para tri-horária.

4.2.1. Cenário O – Funcionamento original do termoacumulador

Os resultados descritos nesta secção, e nas Secções 4.2.2 e 4.2.3, tiveram em consideração um consumo ilustrativo realizado às 08:00. No cenário O (funcionamento original do termoacumulador) foi obtido o funcionamento normal do termoacumulador, para que pudesse ser comparado com os outros cenários, onde o funcionamento do equipamento é controlado de forma diferente. Entende-se por funcionamento original a gama de temperaturas a que o termostato liga e desliga o elemento de aquecimento, de acordo com os valores originais estabelecidos pelo fabricante. Se a temperatura interna do termoacumulador chegar à temperatura máxima o elemento de aquecimento desliga, enquanto que se a temperatura interna chegar à temperatura mínima o elemento de aquecimento liga. Para poder ser comparado de uma forma válida com os outros cenários, foi necessário saber qual a gama de funcionamento a que o termoacumulador normalmente opera, e qual o seu comportamento quando ocorre consumo. Inicialmente foram realizados alguns ensaios sem consumo, para estabilizar o equipamento. Após a estabilização, foram repetidos vários ensaios com consumo às 08:00, de forma a garantir que a determinação da gama de temperaturas de funcionamento fosse precisa. Nas figuras 4.3 e 4.4 são apresentados os gráficos da variação de todas as temperaturas e o funcionamento do termoacumulador, num dia em que ocorreu consumo às 08:00.

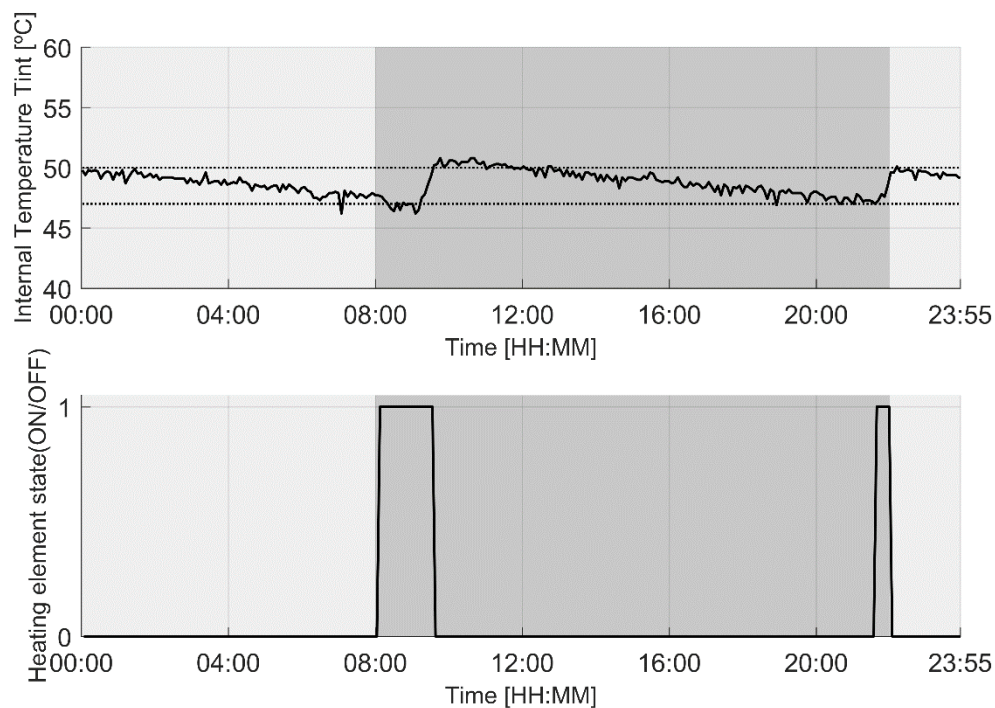


Figura 4.3 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 08:00.

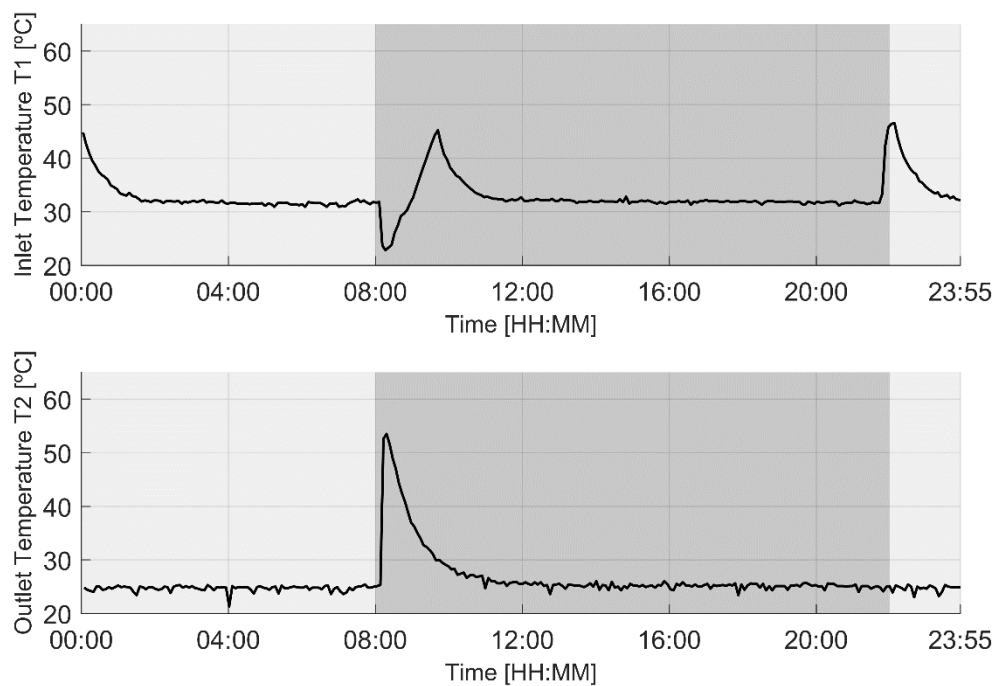


Figura 4.4 – Temperatura das águas de entrada e de saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 08:00.

Em todos os gráficos da Secção 4.2, os períodos da tarifa bi-horária encontram-se destacados por diferentes tonalidades de cinzento no fundo dos gráficos, sendo o cinzento claro correspondente ao período de vazio e o cinzento escuro ao período fora do vazio. Através da Figura 4.3, a partir do gráfico da variação da temperatura interna ao longo do dia, foi possível determinar a temperatura máxima e mínima do termoacumulador. A temperatura mínima foi obtida quando o termoacumulador comutou do estado “OFF” (desligado) para o estado “ON” (ligado), sem qualquer intervenção externa, tal como o consumo que ocorreu às oito horas da manhã. Esta temperatura é de 47 °C e foi registada às 21:36. Por sua vez, a temperatura máxima foi obtida quando aconteceu o inverso, ou seja, quando o termoacumulador passou do estado “ON” para o estado “OFF”. Esta temperatura é de 50 °C e foi registada às 09:35.

Sendo o termoacumulador um reservatório de água, existe a possibilidade de aparecimento de *Legionella*, uma bactéria bastante perigosa para a saúde. Como tal, foi garantido que a temperatura da água se apresentasse sempre superior a 50°C para que a sobrevivência da bactéria fosse dificultada [34]. As temperaturas internas observadas encontram-se abaixo dos 50 °C, mas como o sensor realizou leituras na carcaça do termoacumulador, a temperatura real no interior do tanque foi sempre superior a 50°C, mesmo quando lido 47°C, como apresentado no gráfico de temperatura de saída da Figura 4.4.

Relativamente à Figura 4.4, é de notar que sempre que ocorreu consumo, o termostato acionou o elemento de aquecimento. Isto ocorreu porque o termostato encontra-se perto da entrada de água fria, ou seja, quando entrou água para o interior do termoacumulador, a temperatura na parte inferior do tanque baixou significativamente e consequentemente o termostato ligou o elemento de aquecimento. À medida que foram realizados os testes ao funcionamento normal, descobriu-se que ao regular o termostato para aumentar a temperatura da água, a gama de funcionamento do termoacumulador mantém o seu intervalo de 3°C e aumenta respetivamente a temperatura mínima e máxima.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, é possível observar que existe uma inércia térmica considerável. A temperatura de entrada sobe pouco tempo após o elemento de aquecimento se ligar devido à localização do sensor. No entanto, a temperatura interna só começa a sofrer alteração passado algum tempo após ocorrer aquecimento, porque ao testar um termoacumulador com capacidade de 100L, como referido anteriormente, sempre que ocorre aquecimento, ocorre também o fenómeno das correntes de convecção.

4.2.2. Cenário T50 – Controlo por regras com temperatura máxima de 50°C

Neste cenário foi explorada a flexibilidade energética considerando a mesma gama de temperaturas, relativamente ao funcionamento original do termoacumulador, com o objetivo de reduzir os custos com energia elétrica para aquecer a água. O termoacumulador foi controlado de acordo com as regras definidas na UCR, que foi implementada utilizando o programa MATLAB

[35]. Na tarifa bi-horária utilizada em todos os cenários, o período onde a energia elétrica é mais barata corresponde ao período de vazio, e o mais caro ao período fora do vazio.

O objetivo deste controlo foi deslocar, dentro do possível, o consumo de energia elétrica realizado pelo termoacumulador, para alturas do dia onde a tarifa é mais baixa. Deste modo, é possível atingir este objetivo se no instante de tempo em que ocorre a mudança do período de vazio para o fora de vazio, a temperatura estiver no máximo. Com a mesma gama de funcionamento obtida no cenário original, o termoacumulador foi controlado de forma a manter a temperatura interna no seu valor máximo de 50°C durante o período de vazio; e no valor mínimo de 47°C durante o período fora do vazio.

Por razões de segurança, manteve-se o termostato mecânico ativo para assegurar que a temperatura não excedia o limite máximo caso ocorresse algum erro inesperado no *EF_{syst}*, o que não se veio a verificar. Consequentemente, o controlo não pode ser realizado apenas com a temperatura interna devido à localização do termostato. Se fosse apenas considerada esta variável, quando a temperatura atingisse ao seu limite máximo, o termostato abriria mecanicamente o circuito que fornece energia ao elemento de aquecimento. Quando o fizesse, iria impossibilitar o controlo do elemento de aquecimento enquanto se encontrava no período de arrefecimento e até atingir o limite mínimo.

De forma a garantir que o termostato não limitava a ligação à fonte de energia, para possibilitar o controlo total do funcionamento do termoacumulador, também foi usada a sua temperatura de entrada como variável de controlo. O valor limite foi obtido analisando o gráfico da temperatura de entrada no cenário original presente na Figura 4.4. Ao analisar o gráfico, verifica-se que às 21:45 a temperatura de entrada aumentou. Nesse período a temperatura de entrada foi dos 33°C até aos 45°C em apenas quinze minutos. Visto que a resolução temporal utilizada é de cinco minutos, o valor que garantiu que o termostato não abrisse mecanicamente a meio do controlo, foi de 40°C. Sempre que a temperatura interna estiver mais baixa que a temperatura desejada num determinado período (47°C ou 50°C) e a temperatura de entrada for mais baixa que o limite, o elemento de aquecimento é ligado. Para todos os outros casos o elemento de aquecimento é desligado.

A UCR lê os valores de temperatura interna e temperatura de entrada numa resolução temporal de cinco minutos e realiza o controlo. Devido às variações da temperatura interna, a UCR verifica se o termoacumulador está a aquecer e lê o último valor de temperatura. Caso esteja a arrefecer lê os três últimos valores atualizados e realiza uma média, dando assim mais estabilidade ao controlo.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentados os gráficos da variação de todas as temperaturas e o funcionamento do termoacumulador no cenário T50 para um consumo de 40 litros de águas quente às 08:00.

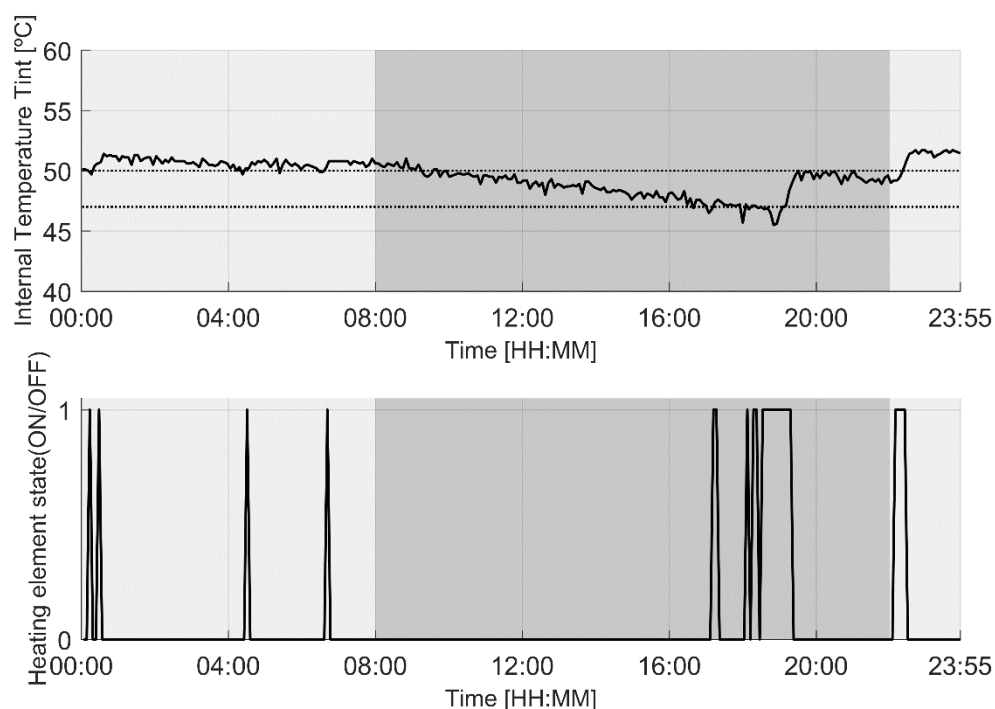


Figura 4.5 – Temperatura interna e funcionamento do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 08:00.

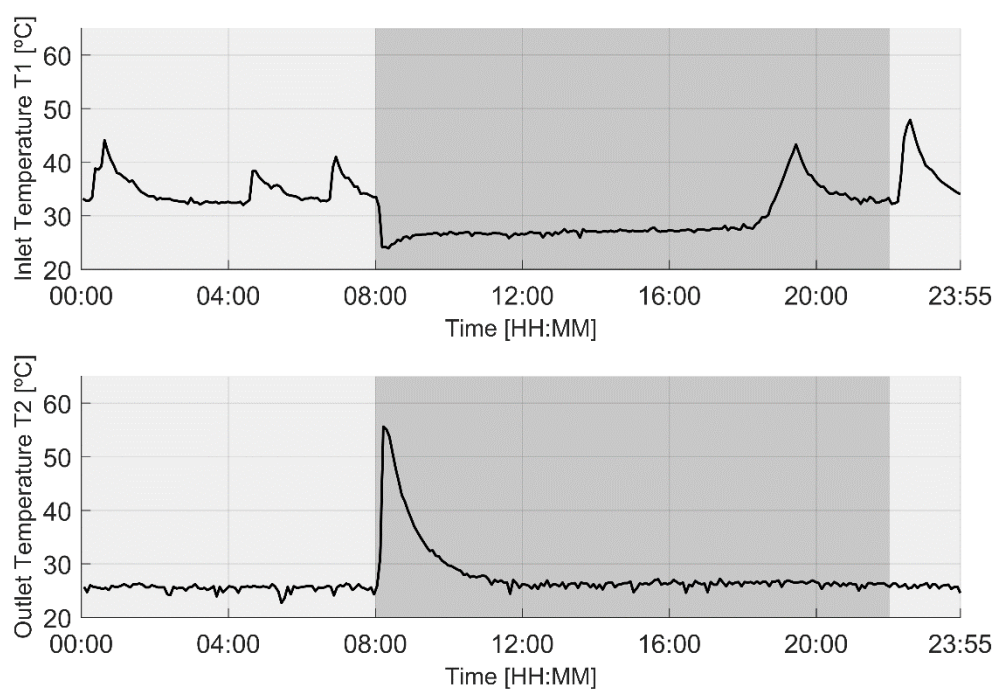


Figura 4.6 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 08:00.

Como neste cenário o termoacumulador foi controlado, quando ocorreu consumo este não ligou como no cenário O, devido às regras implementadas. Após o consumo, a água fria ficou na zona inferior do tanque, permutando calor com a água que estava na zona superior e a uma temperatura mais elevada. Através da estratificação da temperatura ao longo do tanque, não ocorreu uma elevada variação da temperatura interna quando ocorreu consumo às 08:00. Quanto à temperatura de saída, esta apresentou-se mais elevada do que no cenário O, porque quando ocorreu o consumo, a temperatura interna encontrava-se num valor superior. Dentro do período fora de vazio o elemento de aquecimento voltou a ligar quando chegou à temperatura mínima como apresentado na Figura 4.5. Inicialmente após ligar o elemento de aquecimento, existe o efeito de correntes de convecção descrito anteriormente na Secção 4.1, baixando a temperatura interna no instante seguinte. De seguida, assim que chega aos 47°C de temperatura interna e 40°C de temperatura de entrada o elemento foi desligado e toda a quantidade de água que se encontrava com a temperatura mais elevada foi para o topo do tanque influenciando o gráfico de temperatura interna na Figura 4.5, justificando assim a subida apresentada no intervalo de tempo [19:10; 19:30], onde a temperatura interna sobe dos 47°C até aos 50°C.

4.2.3. Cenário T55 – Controlo por regras com temperatura máxima de 55°C

Após os resultados obtidos para o cenário T50, verificou-se a ocorrência de consumo no período fora do vazio. Assim, procedeu-se ao aumento da flexibilidade energética do termoacumulador, elevando o intervalo de temperatura de funcionamento do mesmo, mudando a temperatura máxima de 50°C para 55°C. Estando a água a uma temperatura mais elevada, explorando a capacidade de armazenamento térmico do termoacumulador, realizou-se o seu controlo de forma a que a temperatura se mantivesse nos 55°C e nos 47°C, no período de vazio e no período fora do vazio, respetivamente. O limite de temperatura de entrada foi igual ao do cenário T50 de forma a manter as condições anteriores e analisar apenas a influência do aumento da temperatura máxima. Este controlo tem o objetivo de deslocar o funcionamento do termoacumulador somente para o período de vazio. O termosato do termoacumulador foi regulado para funcionar a temperaturas mais altas de forma a garantir que este não seja acionado. Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os gráficos da variação de todas as temperaturas e o funcionamento do termoacumulador no cenário T55.

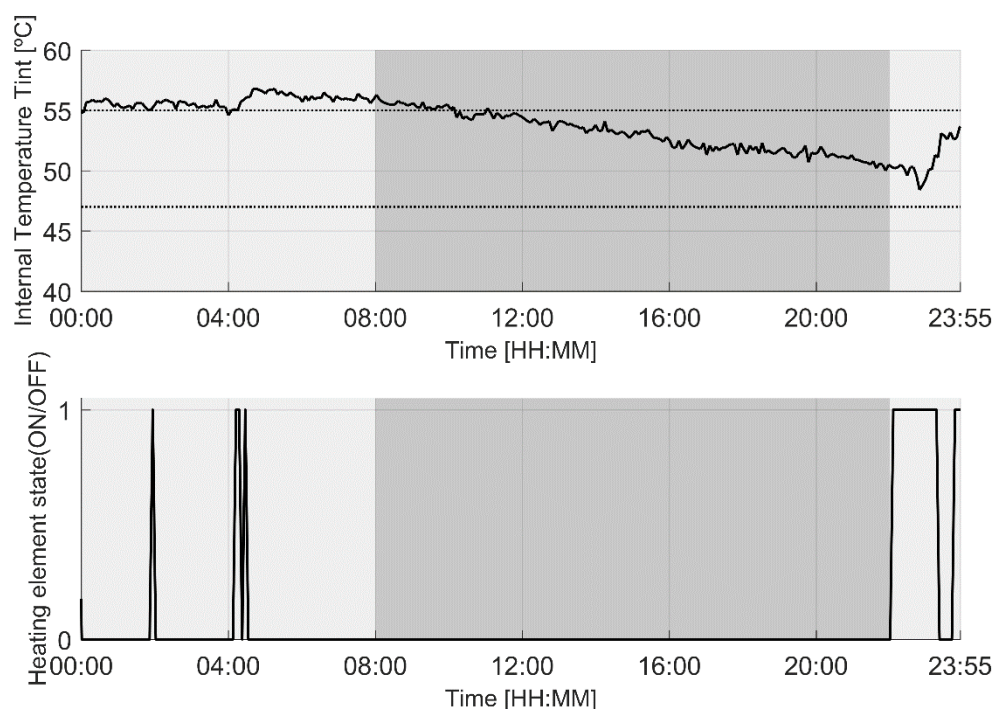


Figura 4.8 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 08:00.

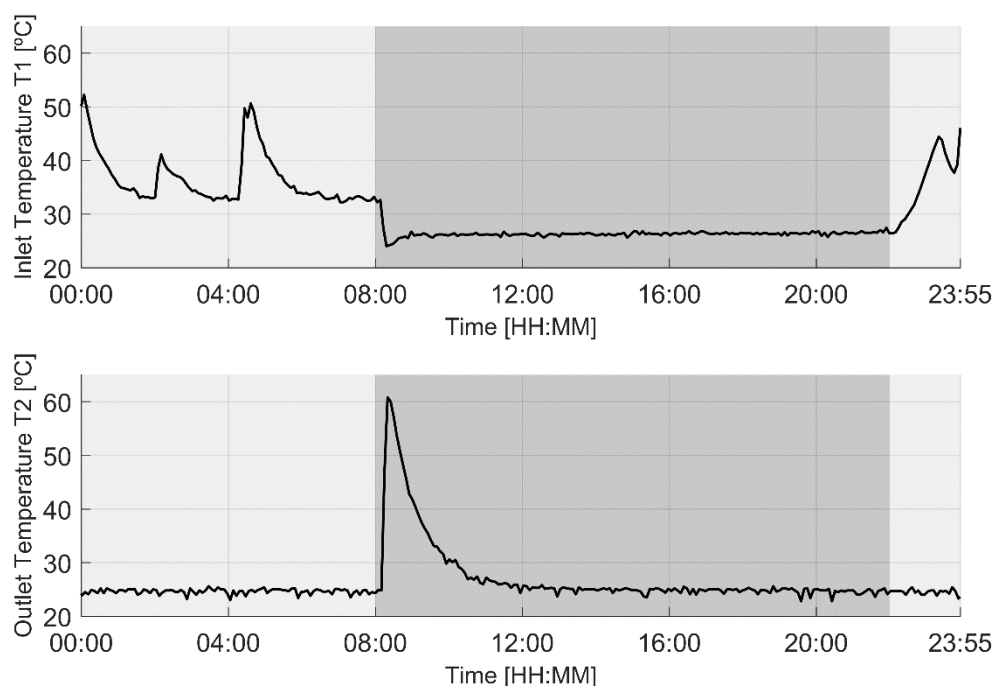


Figura 4.7 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 08:00.

Neste cenário já foi possível controlar o funcionamento de modo a não consumir energia no período fora do vazio. Durante o arrefecimento e após o consumo de água, mais uma vez, a energia correspondente à água quente consumida não foi a suficiente para ocorrer uma variação

significativa no gráfico da temperatura interna da Figura 4.7. Como foram consideradas temperaturas mais elevadas, a temperatura de saída é mais elevada em relação aos restantes cenários.

4.2.4. Análise de Resultados

Para os cenários serem comparáveis é necessário que as condições laboratoriais sejam semelhantes enquanto decorrem as respetivas experiências. Durante as experiências associadas aos três cenários a temperatura ambiente não teve grandes variações, validando assim a comparação. No cenário original, a temperatura ambiente variou entre os [24,6; 25,4] °C. No cenário T50, a temperatura ambiente variou entre os [24,6; 26,5] °C. E por fim, no cenário T55, a temperatura varou entre os [24,5; 25,2] °C. A Figura 4.9 apresenta as temperaturas ambiente para as experiências referentes aos três cenários referidos com consumo de águas quente às 08:00.

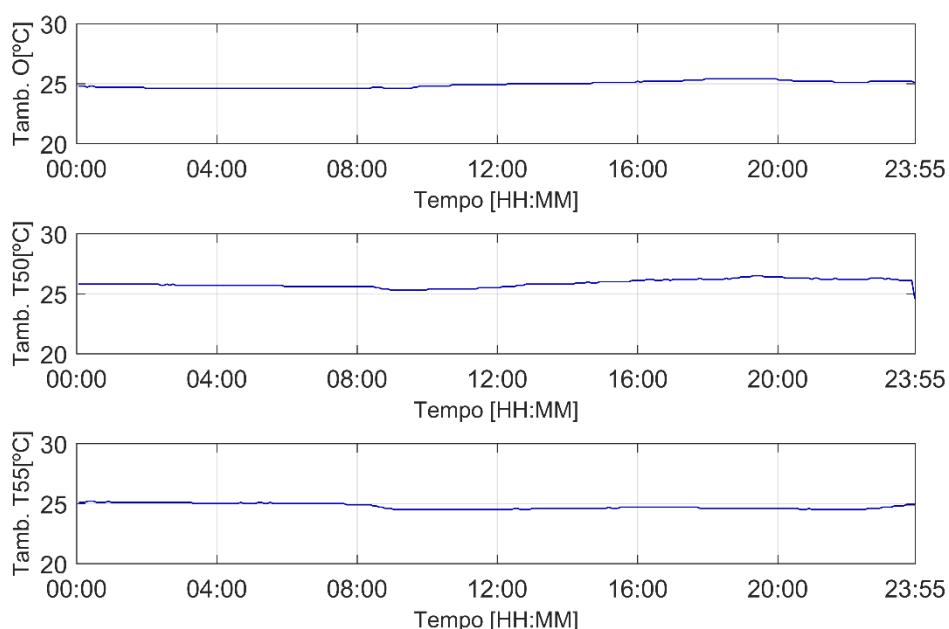


Figura 4.9 – Temperaturas ambiente durante as experiências.

Para determinar os custos é preciso definir os preços da tarifa bi-horária e tri-horária. Para tal foi utilizado o simulador da EDP distribuição [32] para obter os preços. Preenchendo o simulador e assumindo uma potencia contratada de 4,6 kVA, obtiveram-se os seguintes valores apresentados na Tabela 4.1 para ambas as tarifas. Para a tarifa bi-horária foi escolhido a opção de ciclo diário, onde o periodo é igual para os horários de verão e Inverno. E para a tarifa tri-horária foi o ciclo diário, hora legal de Verão [36].

Tabela 4.1 – Preços das Tarifas Bi-horária e Tri-horária utilizados.

Tarifa	Períodos	Preço(€/kWh)
Bi-Horária	Fora do Vazio [08:00; 20:00]	0,187
	Vazio [00:00; 8:00] e [22:00; 00:00]	0,110
Tri-Horária	Ponta [10:30; 13:00] e [19:30; 21:00]	0,274
	Cheias [08:00; 10:30], [13:00; 19:30] e [21:00; 22:00]	0,157
	Vazio [0:00; 8:00] e [22:00; 00:00]	0,104

Depois de serem definidos os preços é calculada a energia consumida dentro de cada período a partir do funcionamento do termoacumulador de cada cenário. Na Tabela 4.2 são expostos os resultados correspondentes aos três cenários, onde se consumiu 40 L de AQS às 08:00, segundo a tarifa Bi-horária.

Tabela 4.2 – Custos e energia consumida dos três cenários com consumo às 08:00.

Cenário	Custos (€)	Energia consumida no Vazio (kWh)	Energia consumida Fora do Vazio (kWh)	Total (kWh)
O	0,54	0,00	2,90	2,90
T50	0,46	1,00	1,90	2,90
T55	0,30	2,77	0,00	2,77

Comparando com o cenário original, o cenário T50 apresenta uma redução de custos de 12% e o cenário T55 uma redução de 46,3%. Analisando estes resultados, verifica-se que ao aumentar o intervalo de temperaturas de funcionamento, o termoacumulador é mais flexível e consequentemente a redução de custos é mais elevada. O controlo realizado em ambos os cenários são iguais, o que varia é a temperatura máxima, tendo o cenário T50 um intervalo de 3°C entre a temperatura máxima e mínima e o cenário T55 um intervalo de 8°C. Com a gama utilizada no cenário T55 foi possível deslocar todo o funcionamento do termoacumulador para o período onde a energia é mais barata, trazendo assim um maior benefício económico para o utilizador.

Posteriormente procedeu-se à variação do instante associado ao consumo de água quente, simulando um banho de um indivíduo em vários períodos do dia. Para cada cenário foi realizada uma experiência com vários dias, onde em cada dia foi criado um banho a uma hora específica, considerando um consumo ininterrupto de 40 litros de águas quente. Isto corresponde a um banho às 00:00, 04:00, 08:00, 12:00, 16:00 e 20:00 para cada um dos cenários (original, T50 e T55), sendo assim necessários seis dias de recolha de dados para cada cenário. Figura 4.10 apresenta os resultados deste estudo usando o controlo do cenário T50 em comparação com o

cenário O e na Tabela 4.3 encontra-se a energia consumida, os custos e poupanças, para cada período de consumo e cenário.

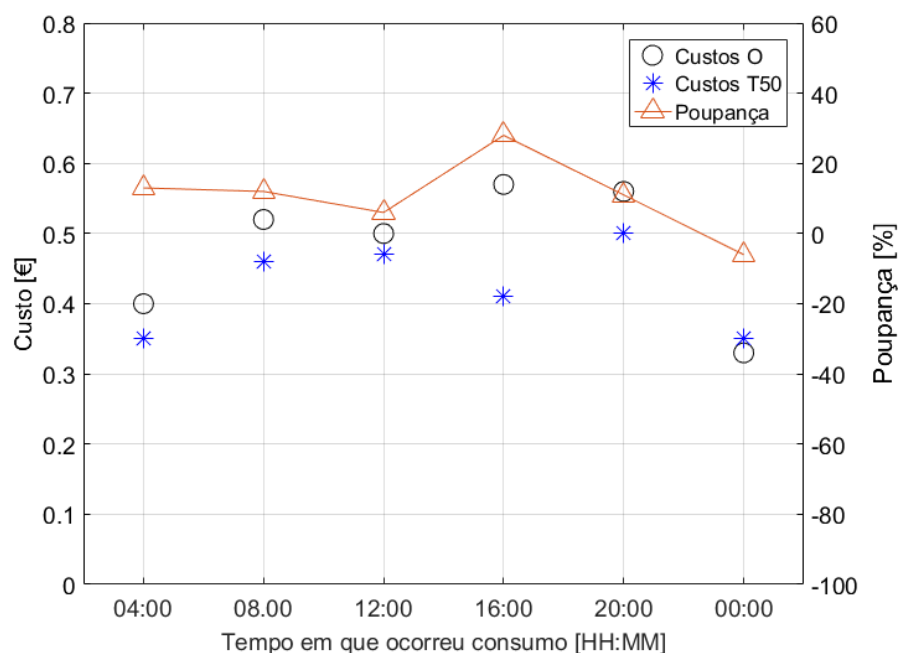


Figura 4.10 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T50 e ao Cenário O para vários consumos de água quente.

Tabela 4.3 – Custos, Energia consumida e poupanças do Cenário T50 e do Cenário O.

Tempo em que ocorreu consumo [HH:MM]	Custos O [€]	Energia consumida O [kWh]	Custos T50 [€]	Energia consumida T50 [kWh]	Poupança [%]
00:00	0,33	2,64	0,35	2,90	-6,0
04:00	0,40	3,21	0,35	3,15	12,5
08:00	0,52	3,06	0,46	2,90	11,5
12:00	0,50	2,89	0,47	3,02	6,0
16:00	0,57	3,32	0,41	2,52	28,0
20:00	0,56	3,27	0,50	3,02	10,7
Média	0,48	3,07	0,43	2,92	10,5

Relativamente ao cenário original, ao se variar o período de consumo ao longo dos dias, os custos consequentemente vão variando. Os custos são mais baixos se o consumo for feito em alturas da noite (04:00 e 00:00), pois o termoacumulador funciona quase totalmente no período de vazio, demonstrado na Figura 4.10. Relativamente ao cenário T50 ocorreram poupanças em todas as horas testadas exceto às 00:00. Isto deve-se ao facto de ter ocorrido mais consumo de energia comparativamente ao cenário original. Ao consumir às 00:00, o termoacumulador no cenário O, é obrigado a ligar instantaneamente após a água fria entrar para o equipamento.

Como o consumo ocorreu no período de vazio, o equipamento funcionou 90% do tempo em período de vazio.

Na Figura 4.11 são expostos os resultados referentes ao cenário T55 e na Tabela 4.4 a energia consumida, os custos e poupanças, para cada período de consumo e cenário.

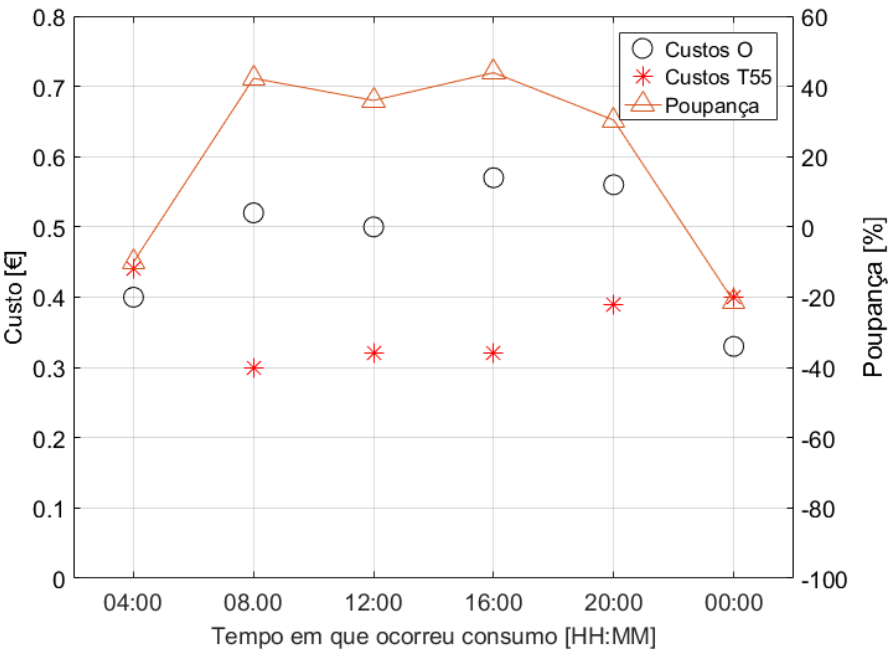


Figura 4.11 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T55 e ao Cenário O para vários consumos de água quente.

Tabela 4.4 – Energia consumida no cenário O e T55.

Tempo em que ocorreu consumo [HH:MM]	Custos O [€]	Energia consumida O [kWh]	Custos T55 [€]	Energia consumida T55 [kWh]	Poupança [%]
00:00	0,33	2,64	0,4	3,53	-21,2
04:00	0,40	3,21	0,44	4,00	-10,0
08:00	0,52	3,06	0,30	2,64	42,3
12:00	0,50	2,89	0,32	2,9	36,0
16:00	0,57	3,32	0,32	2,9	43,9
20:00	0,56	3,27	0,39	3,53	30,4
Média	0,48	3,07	0,36	3,30	20,2

O funcionamento convencional deste termoacumulador, quando ocorre consumo às 00:00, acaba por ser melhor em comparação com os dois cenários de controlo porque houve menor consumo de energia. Isto é uma consequência do controlo por regras implementado em ambos os cenários. Como é controlado o equipamento para ter sempre a sua temperatura interna no máximo durante os períodos de vazio, sempre que ocorre consumo, ele necessita de repor a

energia extraída, mais a energia correspondente ao aquecimento da água fria que acaba de entrar no tanque, para voltar a ter a temperatura no máximo, quer no T50 ou no T55.

No cenário T55, a temperatura de consumo da água extraída do termoacumulador é mais elevada que nos outros cenários. Mais especificamente, nos períodos de consumo onde ocorreu o aumento dos custos (00:00 e 04:00), apesar do funcionamento ocorrer sempre no período de vazio, a energia consumida foi muito mais elevada devido à diferença entre temperaturas de consumo, como apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Temperatura da água quente consumida nos três cenários (00:00 e 04:00).

Tempo em que ocorreu consumo [HH:MM]	Temperatura da água consumida no cenário O [°C]	Temperatura da água consumida no cenário T50 [°C]	Temperatura da água consumida no cenário T55 [°C]
00:00	55,3	55,3	63,3
04:00	55,6	56,3	62,9
Média	55,45	55,8	63,1

Nos outros períodos de consumo, como ocorreram no período fora de vazio, o elemento de aquecimento não foi ligado quando o termoacumulador era controlado por regras, pois a temperatura interna sempre esteve superior aos 47°C. O controlo realizado no cenário T55 permitiu que apesar de ocorrer consumo nos vários períodos designados, o funcionamento do termoacumulador foi sempre deslocado para o período de vazio, permitindo poupanças consideráveis. Quando ocorre consumo nos períodos fora de vazio, ou seja, 08:00, 12:00, 16:00 e 20:00, o controlo feito no cenário T55, proporciona poupanças mais elevadas comparativamente ao cenário T50. A gama utilizada no cenário T55 (47°C e 55°C) permite poupanças acima dos 30%, se apenas um banho for tomado dentro do intervalo [08:00;20:00]. Enquanto a gama utilizada no cenário T50 (47°C e 50°C), permite poupanças acima dos 6%. A partir do mesmo tipo de controlo por regras, estando sujeito a uma tarifa bi-horária, a gama de temperaturas utilizada no cenário T55 reduziu em média 20% dos custos e a do cenário T50 reduziu 10%. Num caso mais realista, com a utilização de uma torneira de mistura, os consumos seriam diferentes. Como a torneira mistura água quente com água fria de forma a regular e fornecer a água a uma temperatura desejada, o consumo de água quente no cenário T55 seria menor comparando com os cenários O e T50, precisamente por ter temperaturas mais altas. Neste caso, no cenário T55 seria consumida mais água fria do que nos outros cenários, para obter a mesma temperatura desejada.

De seguida, com o objetivo de avaliar a variação dos custos quando é utilizada uma tarifa tri-horária, com os mesmos resultados relativamente ao funcionamento do termoacumulador em todos os cenários, alterou-se a tarifa de energia. Recorrendo novamente ao simulador da EDP distribuição, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 4.1. Na Figura 4.12, 4.13 e Tabela 4.6, encontram-se os resultados correspondentes à mudança de tarifa.

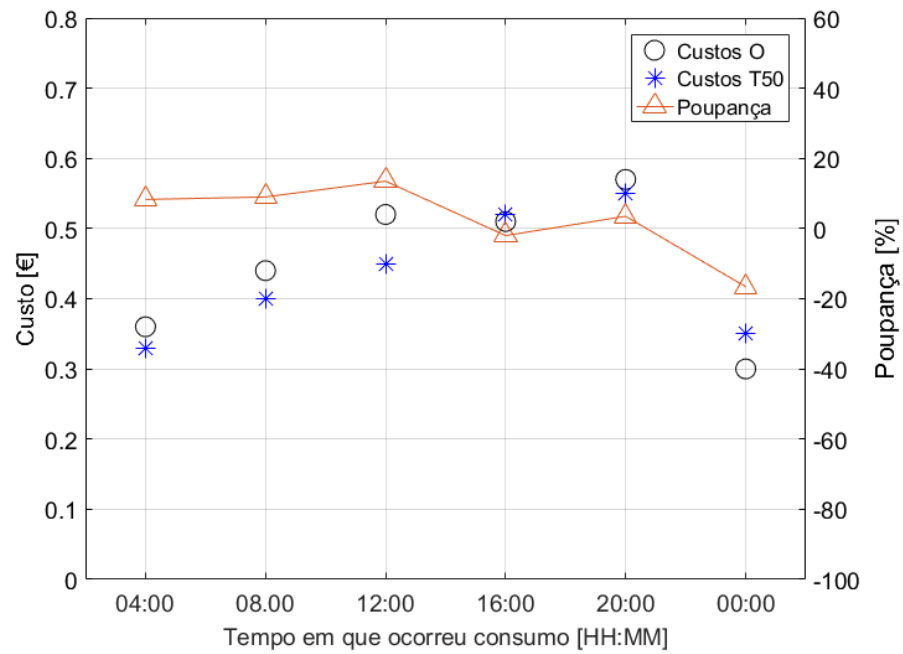


Figura 4.12 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T50 e ao Cenário O para vários consumos de água quente, usando a tarifa tri-horária.

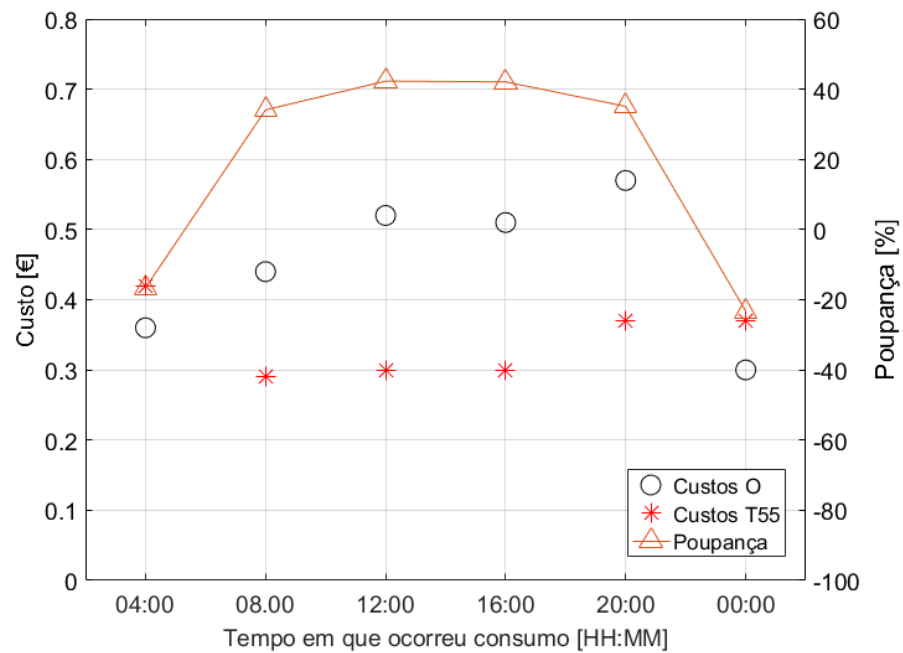


Figura 4.13 – Comparação entre os resultados associados ao Cenário T55 e ao Cenário O para vários consumos de água quente, usando a tarifa tri-horária.

Tabela 4.6 – Custos e poupanças com uma tarifa tri-horária.

Tempo em que ocorreu consumo [HH:MM]	Custos O [€]	Custos T50 [€]	Custos T55 [€]	Poupança T50 [%]	Poupança T55 [%]
00:00	0,30	0,35	0,37	-16,6	-23,3
04:00	0,36	0,33	0,42	8,3	-16,6
08:00	0,44	0,4	0,29	9,0	34,1
12:00	0,52	0,45	0,30	13,5	42,3
16:00	0,51	0,52	0,30	-2,0	42,1
20:00	0,57	0,55	0,37	3,5	35,1
Média	0,45	0,43	0,34	2,62	19,0

Com o controlo do cenário T50, o termoacumulador consome energia em alguns periodos fora do vazio. Na Figura 4.14 é apresentado os gráficos da temperatura interna e do funcionamento do termoacumulador no cenário T50 com consumo às 16:00.

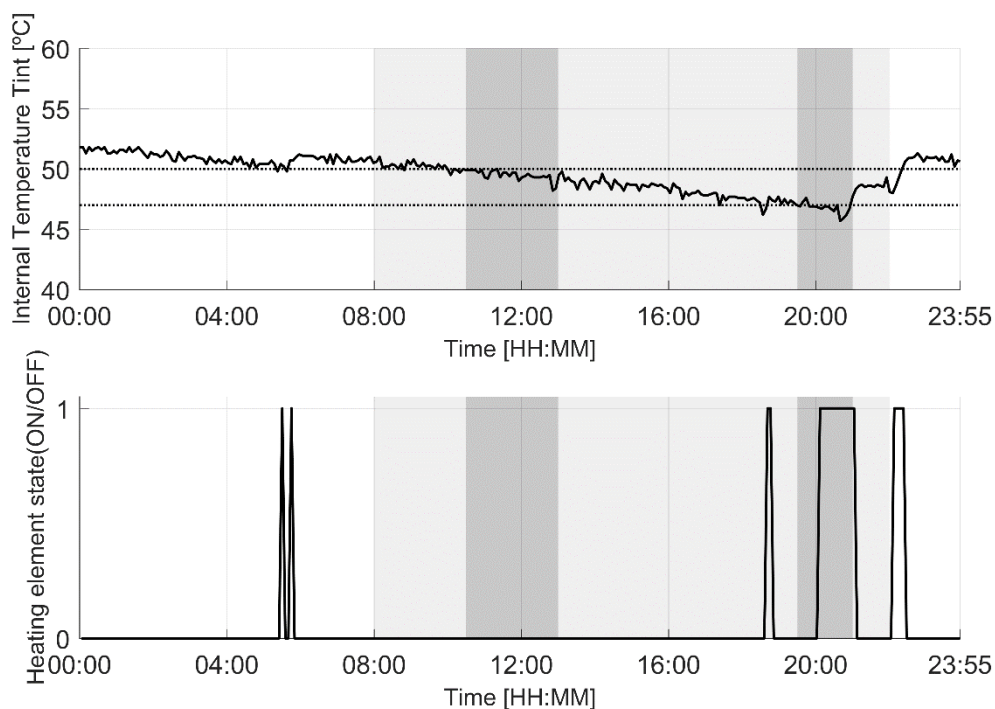


Figura 4.14 – Temperatura interna e funcionamento no cenário T50 com consumo às 16:00

Neste caso, o periodo de vazio encontra-se representado a branco, o periodo de cheias a cizento claro e o periodo de ponta a cinzento escuro. Consequentemente, quando é aplicada uma tarifa tri-horária, em algumas experiências o termoacumulador consumiu em periodos de cheia e de ponta. Neste caso em concreto apresentado na Figura 4.14, a poupança com consumo às 16:00 é negativa em comparação com a tarifa bi-horária, porque o termoacumulador funcionou em periodos de cheia e de ponta. Relativamente à gama utilizada no cenário T55, esta permitiu que

o termoacumulador funcionasse sempre no período de vazio. Ao mudar de tarifa o custo não variou tanto em comparação com o cenário T50. De um modo geral, explorando a flexibilidade energética disponível neste termoacumulador, o controlo implementado a partir do EFsyst, seja com a gama de temperaturas dos cenários T50 ou T55, cumpriu o seu objetivo. Onde a gama de temperaturas interna [47; 55]°C usada no cenário T55 apresentou melhores resultados a nível geral, comparando com os outros. Todos os gráficos dos ensaios realizados encontram-se no Anexo I deste documento.

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo tem início com a apresentação das contribuições da investigação realizada neste trabalho, bem como as respetivas conclusões. De seguida são mencionados os trabalhos futuros que levariam a possíveis melhorias do trabalho desenvolvido

5.1. Contribuições

Atualmente existe o crescimento da produção descentralizada a partir de fontes de energia renovável, devido aos problemas climáticos existentes e outros fatores (e.g. económicos). Estas fontes, apesar de serem sustentáveis, dependem da disponibilidade do respetivo recurso energético, podendo introduzir desafios para a rede de energia. De modo a ter uma rede estável e confiável, a utilização da flexibilidade energética é considerada como parte integrante para a resolução de desequilíbrios entre produção e consumo. A flexibilidade energética é a capacidade de um sistema alterar o seu consumo ou produção de energia, não colocando em causa as necessidades, tanto da rede como do consumidor, em resposta a sinais externos, como, por exemplo, a própria variabilidade de uma fonte de energia. O foco do trabalho descrito nesta dissertação foi a exploração da flexibilidade energética do lado da procura, onde os equipamentos em causa variam o seu consumo de forma a cumprir os objetivos impostos não pondo em causa o seu conforto.

Após revisão de literatura, foi identificado que o desenvolvimento e avaliação de métodos de DR são maioritariamente baseados em simulação. Logo, com o objetivo de aproximar o desenvolvimento e avaliação de métodos de DR ao mundo real, foi desenvolvido um sistema, que suporta o desenvolvimento de controlos de DR que exploram a flexibilidade energética existente em sistemas de aquecimento e armazenamento de AQS em contexto real. Além disso, o sistema desenvolvido permite a partilha de recursos, onde os métodos de DR podem ser desenvolvidos remotamente. Este sistema, designado por *EFsyst*, segue uma arquitetura modular, permitindo a implementação de cada componente de acordo com as tecnologias disponíveis e necessidades do utilizador.

Posteriormente realizou-se um caso de estudo, onde o *EFsyst* foi implementado para se estudar a flexibilidade energética disponibilizada por um termoacumulador, onde o objetivo foi reduzir os custos com energia elétrica inerentes ao aquecimento de águas quentes sanitárias. Focando no contexto tarifário português, o preço de energia consumida dependeu da tarifa utilizada. Neste caso de estudo foram usadas ambas as tarifas bi-horária e tri-horária, segundo a EDP Comercial. Realizaram-se três cenários de estudo: o cenário original, designado por cenário O, onde o termoacumulador funciona normalmente; o cenário T50, onde foi aplicado um controlo por regras com o mesma gama de temperaturas de funcionamento obtidas no cenário O, em períodos onde preço é mais barato a temperatura interna foi mantida no seu valor máximo e períodos mais caros, a temperatura interna foi mantida no seu valor mínimo; no ultimo cenário, cenário T55,

usou-se o mesmo controlo mas foi aumentada temperatura interna máxima. Inicialmente considerou-se o consumo de 40 litros de água quente às 08:00 em todos os cenários e posterior variou-se a altura de consumo para as horas 12:00, 16:00, 20:00, 00:00 e 04:00.

Após serem testados todos os cenários, o cenário T55 apresentou melhores poupanças que o Cenário T50 e o Cenário O, apesar da energia consumida ser maior, pois a flexibilidade energética do equipamento foi aumentada, com o aumento da gama de temperaturas de funcionamento. A partir deste estudo é possível concluir que as melhores alturas para tomar um banho utilizando 40 litros de águas quente são 00:00 e 04:00, se o termoacumulador estudado estiver a funcionar sem qualquer controlo, e 08:00, 12:00, 16:00 e 20:00 se o termoacumulador estiver a ser controlado como descrito no cenário T55.

Posto isto, este trabalho descreve o desenvolvimento do *EFsyst*, cuja validação foi realizada no caso de estudo descrito no subcapítulo 4.1. O *EFsyst* poderá ser um componente importante no desenvolvimento e validação de novos métodos de DR em sistema de aquecimento e armazenamento de AQS.

5.2. Trabalhos Futuros

Neste caso de estudo realizado, foi considerado que os 40 litros de água quente são diretamente consumidos do termoacumulador, desprezando as temperaturas registadas. Esta consideração teve algum impacto nos resultados obtidos em ambos os cenários T50 e T55. Devido a este impacto, num trabalho futuro, seria interessante implementar um componente que misture a água quente com a água fria, simulando realmente o que acontece na realidade dentro de uma habitação que utilize um termoacumulador. Posteriormente também se poderá variar o número de utilizadores para analisar o comportamento do termoacumulador quando o consumo é mais elevado. Num trabalho futuro, seria interessante testar algoritmos de previsão de consumo, com o objetivo de serem validados em condições reais.

Como o *EFsyst* permite ao utilizador variar o controlo que quer testar, num trabalho futuro teria interesse a aplicação de algoritmos para otimizar o funcionamento do equipamento, com inúmeros objetivos, tais como, otimizar o autoconsumo de energia solar, redução de emissões, otimizar o autoconsumo de energia eólica, redução de custos, entre outros.

Num outro trabalho futuro, de modo a simplificar a utilização da UCR do *EFsyst*, seria interessante o desenvolvimento de uma aplicação onde o utilizador poderia variar parâmetros de funcionamento em tempo real, sem ter de voltar a programar a UCR. Por fim, seria também interessante expandir as funcionalidades desenvolvidas do *EFsyst* a outros dispositivos de aquecimento e armazenamento de AQS, ou até mesmo a outros dispositivos que tenham a possibilidade de implementar métodos de DR.

Referências Bibliográficas

- [1] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2018," 2018. ISBN: 9789264306776
- [2] P. Denholm and M. Hand, "Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity," *Energy Policy*, vol. 39, no. 3, pp. 1817–1830, 2011. doi: 10.1016/j.enpol.2011.01.019
- [3] Søren Østergaard Jensen, Henrik Madsen, Rui Lopes, et al. "Energy Flexibility as a key asset in a smart building future - Contribution of Annex 67 to the European Smart Building Initiatives". Position paper of the IEA-EBC Annex 67 "Energy Flexible Buildings". Disponível em <http://www.annex67.org/publications/position-paper/> (Acedido em 10/09/2019).
- [4] International Energy Agency, "Energy Efficiency Indicators : Fundamentals on Statistics," 2014. Disponível em <https://webstore.iea.org/energy-efficiency-indicators-fundamentals-on-statistics> (Acedido em 15/09/2019).
- [5] E. Fuentes, L. Arce, and J. Salom, "A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. May 2017, pp. 1530–1547, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229>
- [6] R. A. Lopes, A. Chambel, J. Neves, D. Aelenei, and J. Martins, "A literature review of methodologies used to assess the energy flexibility of buildings," *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1053–1058, 2016. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.274
- [7] D. Aelenei, R. A. Lopes, L. Aelenei, and H. Gonçalves, "Investigating the potential for energy flexibility in an office building with a vertical BIPV and a PV roof system," *Renew. Energy*, 2018. doi: 10.1016/j.renene.2018.07.140
- [8] R. Veríssimo, R. A. Lopes and J. F. Martins, "Energy Storage Systems to prevent distribution transformers overload with high NZEB penetration.", 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2018. doi: 10.1109/IECON.2018.8591071
- [9] R. A. Lopes, "Extending nearly Zero-Energy Buildings Load Matching Improvement to Community-Level", Ph.D. dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2017. disponível em <https://run.unl.pt/handle/10362/29113> (Acedido em 15/09/2019)
- [10] Â. Casaleiro, R. Figueiredo, D. Neves, M. C. Brito, and C. A. Silva, "Optimization of Photovoltaic Self-consumption using Domestic Hot Water Systems," Vol 6, pp. 291–304, 2018. doi: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0178>

- [11] D. Neves, M. C. Brito, and C. A. Silva, "Impact of solar and wind forecast uncertainties on demand response of isolated microgrids," *Renew. Energy*, pp. 1–13, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.075>
- [12] P. Du and N. Lu, "Appliance Commitment for Household Load Scheduling," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 411–419, 2011. doi: 10.1109/TSG.2011.2140344
- [13] K. Al-Jabery, Z. Xu, W. Yu, D. C. Wunsch, J. Xiong, and Y. Shi, "Demand-Side Management of Domestic Electric Water Heaters Using Approximate Dynamic Programming," *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 36, no. 5, pp. 775–788, 2017. doi: 10.1109/TCAD.2016.2598563
- [14] Z. Chen, S. Member, L. Wu, and Y. Fu, "Real-Time Price-Based Demand Response Management for Residential Appliances via Stochastic Optimization and Robust Optimization," vol. 3, no. 4, pp. 1822–1831, 2012. doi: 10.1109/TSG.2012.2212729
- [15] P. Kepplinger, G. Huber, and J. Petrasch, "Autonomous optimal control for demand side management with resistive domestic hot water heaters using linear optimization," *Energy Build.*, vol. 100, pp. 50–55, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.016>
- [16] V. Kapsalis, G. Safouri, and L. Hadellis, "Cost/comfort-oriented optimization algorithm for operation scheduling of electric water heaters under dynamic pricing," *J. Clean. Prod.*, vol. 198, pp. 1053–1065, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.024>
- [17] B. Lin, S. Li, and Y. Xiao, "Optimal and learning-based demand response mechanism for electric water heater system," *Energies*, vol. 10, no. 11, 2017. doi: 10.3390/en10111722
- [18] Q. Wu, L. Wang, and B. Li, "An optimized demand response strategy for electric water heaters and the associated impact on power system operational reliability," *2017 Int. Smart Cities Conf. ISC2 2017*, 2017. doi: 10.1109/ISC2.2017.8090815
- [19] F. Ruelens, B. J. Claessens, S. Quaiyum, B. De Schutter, R. Babuška, and R. Belmans, "Reinforcement Learning Applied to an Electric Water Heater: From Theory to Practice," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3792–3800, 2018. doi:10.1109/TSG.2016.2640184
- [20] J. J. Shah, M. C. Nielsen, T. S. Shaffer, and R. L. Fittro, "Cost-Optimal Consumption-Aware Electric Water Heating Via Thermal Storage under Time-of-Use Pricing," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 592–599, 2016. doi: 10.1109/TSG.2015.2483502
- [21] M. Heleno *et al.*, "Optimizing PV self-consumption through electric water heater modeling and scheduling," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, 2015. doi: 10.1109/PTC.2015.7232636
- [22] S. A. Pourmousavi, S. N. Patrick, and M. H. Nehrir, "Real-Time Demand Response Through Aggregate Electric Water Heaters for Load Shifting and Balancing Wind

Generation,” vol. 5, no. 2, pp. 769–778, 2014. doi: 10.1109/TSG.2013.2290084

- [23] N. Fitzgerald, A. M. Foley, and E. McKeogh, “Integrating wind power using intelligent electric water heating,” *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 135–143, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.014>
- [24] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition*, Academic Press, 2014. ISBN: 978-0-12-397270-5
- [25] “Arduino R3”. Disponível em <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. (Acedido em 11/08/2019).
- [26] “ThingSpeak”. Disponível em <https://thingspeak.com/>. (Acedido em 11/08/2019).
- [27] “Leroy Merlin.” Disponível em <https://www.leroymerlin.pt/>. (Acedido em 11/08/2019).
- [28] “Digikey.” Disponível em <https://www.digikey.pt/>. (Acedido em 10/09/2019).
- [29] “SolidWorks.” Disponível em <https://www.solidworks.com/>. (Acedido em 11/08/2019).
- [30] “Termoacumulador Delta 100L.” Disponível em https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Canalizacao/Termoacumuladores/WPR_REF_14429254. (Acedido em 14/03/2019).
- [31] “ERSE.” Disponível em <http://www.erse.pt/PT/ELECTRICIDADE/Paginas/default.aspx>. (Acedido em 11/09/2019).
- [32] “Edp Comercial.” Disponível em <https://www.edp.pt/particulares/energia/tarifarios/>. (Acedido em 20/08/2019).
- [33] “Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.” Disponível em <https://www.dee.fct.unl.pt/>. (Acedido em 11/09/2019).
- [34] Instituto Português da Qualidade em parceria com a EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A, “Prevenção e controlo de Legionella no sistemas de água.”, 2º Edição, 2014. Disponível em <https://www.dgs.pt/documentos-e-publicacoes/prevencao-e-controlo-de-legionella-nos-sistemas-de-agua.aspx>. (Acedido em 25/08/2019).
- [35] “MATLAB.” Disponível em <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. (Acedido em 11/09/2019).
- [36] “Edp Comercial.” Disponível em <https://www.edp.pt/particulares/apoio-cliente/perguntas-frequentes/tarifarios/o-que-preciso-de-saber-para-contratar/o-que-e-a-opcao-horaria-e-qual-a-melhor-para-mim/faq-4823>. (Acedido em 20/08/2019).

Anexo A – Resultados das experiências associadas ao caso de estudo

Neste anexo são apresentados os resultados dos três cenários do caso de estudo realizado: Cenário O, onde o termoacumulador funcionou normalmente; Cenário T50, onde o termoacumulador foi controlado por regras na mesma gama de temperaturas do funcionamento normal; e por fim, Cenário T55, onde o termoacumulador foi controlado a partir das mesmas regras, mas numa gama diferente de temperaturas de funcionamento. Ambos o caso de estudo e os seus três cenários encontram-se descritos no Capítulo 4.

Cenário O – Consumo às 00:00

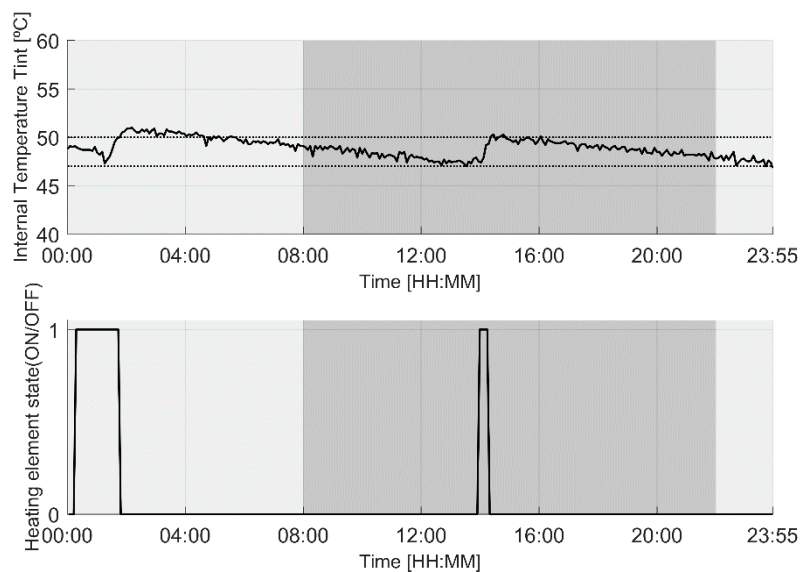


Figura A.1 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 00:00.

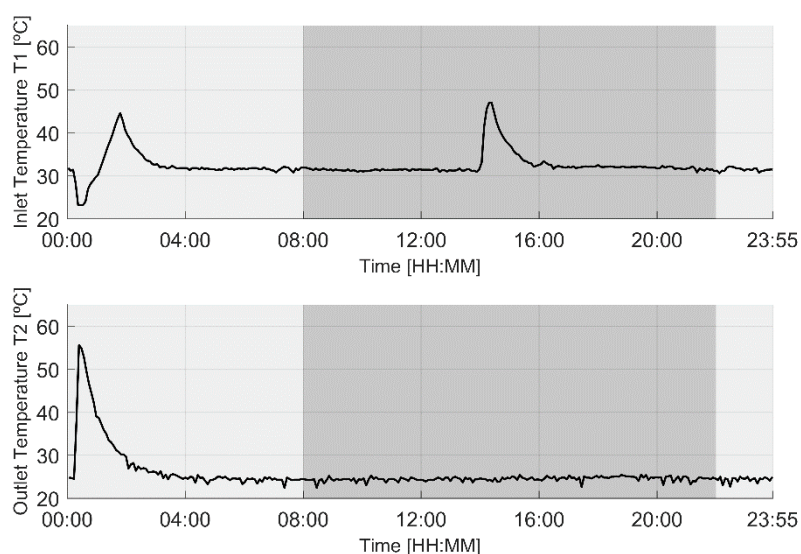


Figura A.2 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 00:00.

Cenário O – Consumo às 04:00

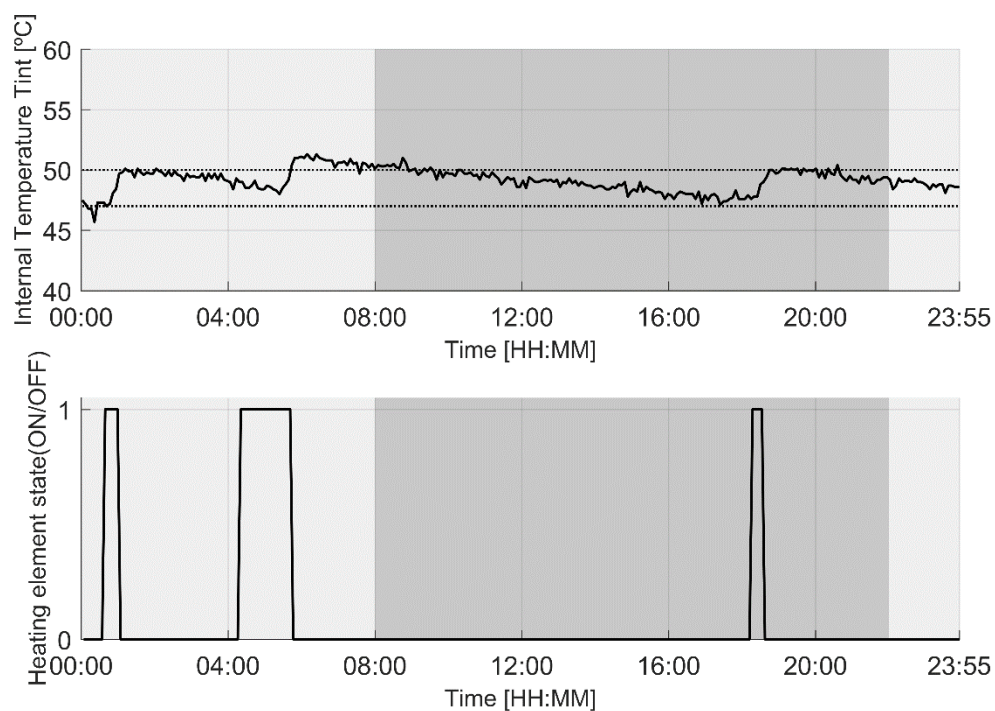


Figura A.3 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 04:00.

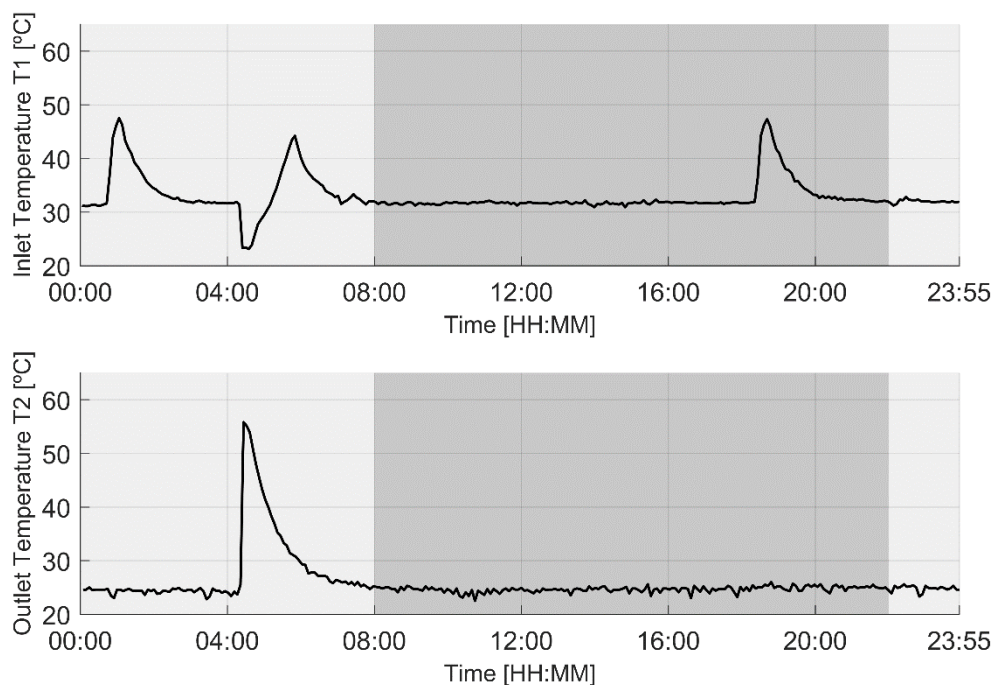


Figura A.4 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 04:00.

Cenário O - Consumo às 08:00

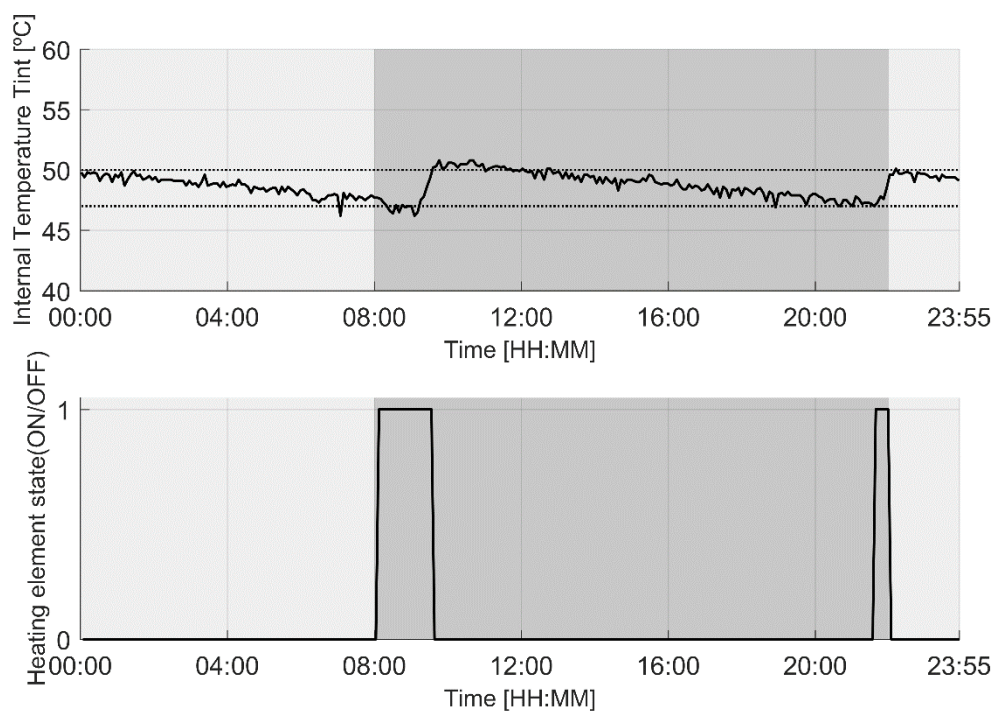


Figura A.5 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 08:00.

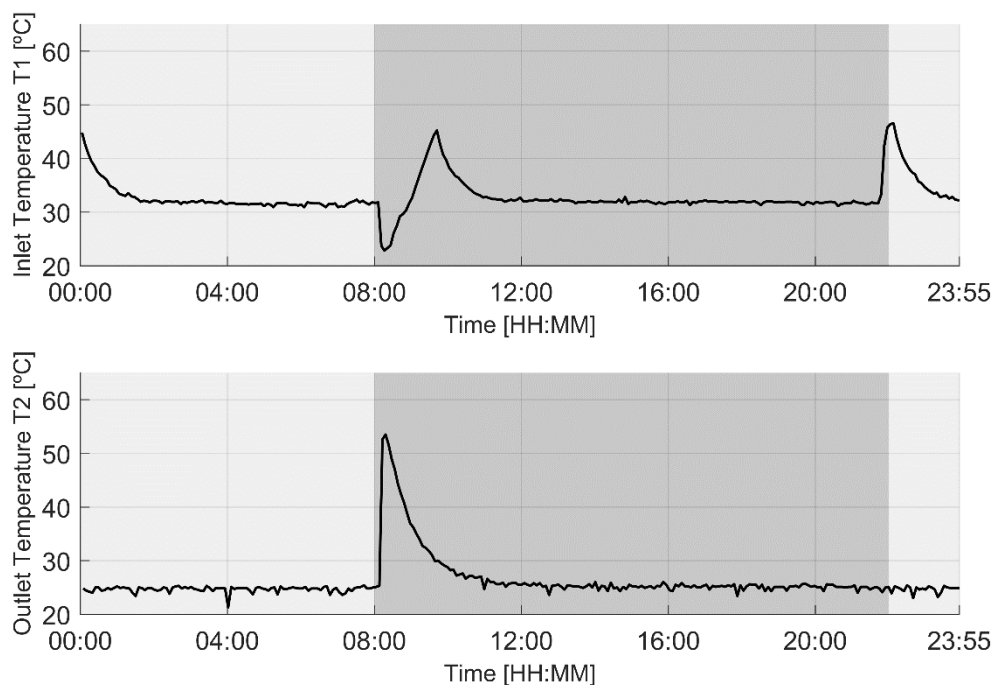


Figura A.6 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 08:00.

Cenário O - Consumo às 12:00

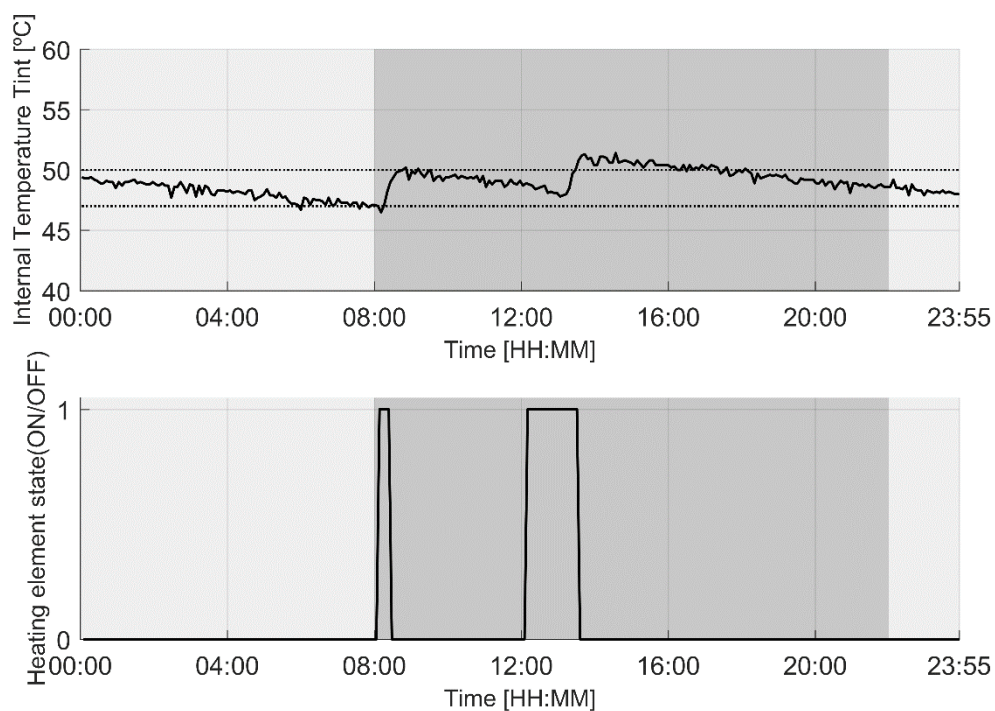


Figura A.7 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 12:00.

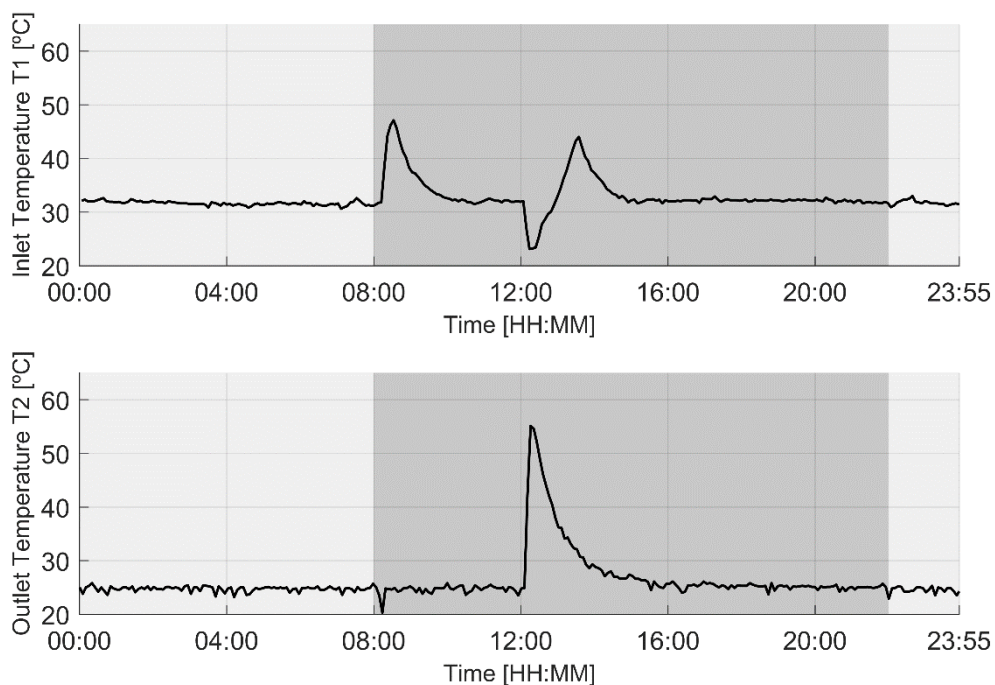


Figura A.8 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 12:00.

Cenário O - Consumo às 16:00

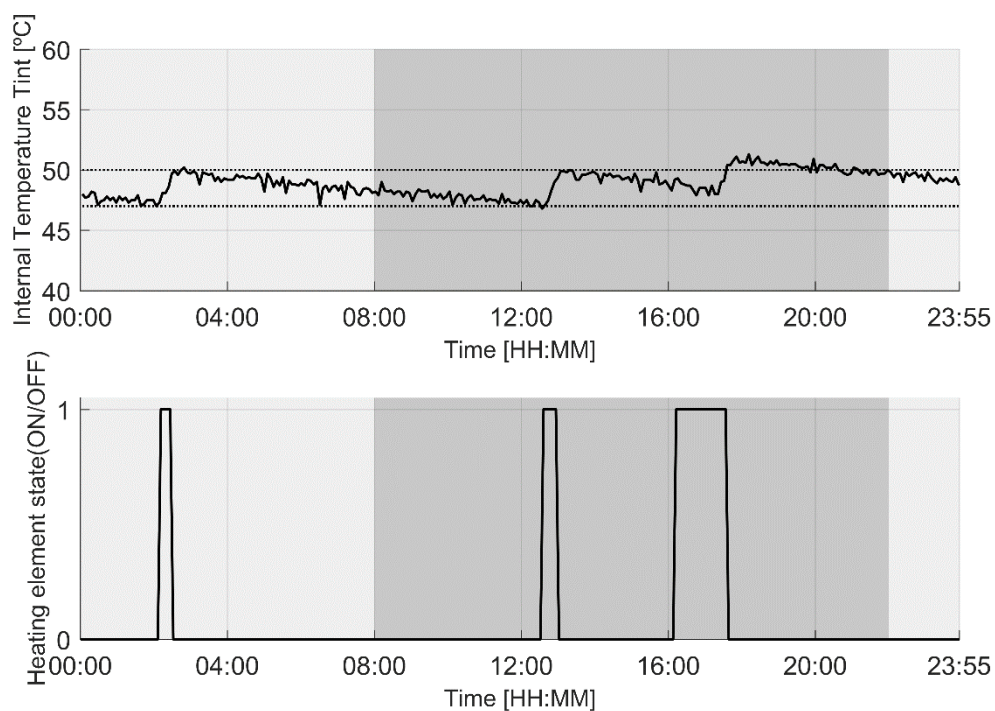


Figura A.9 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 16:00.

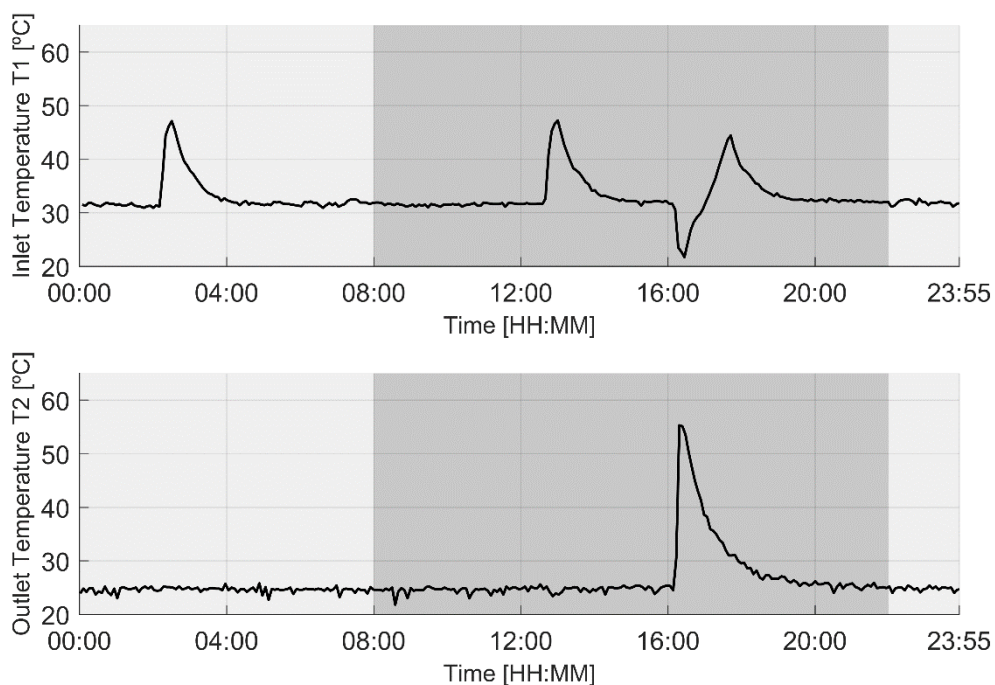


Figura A.10 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 16:00.

Cenário O - Consumo às 20:00

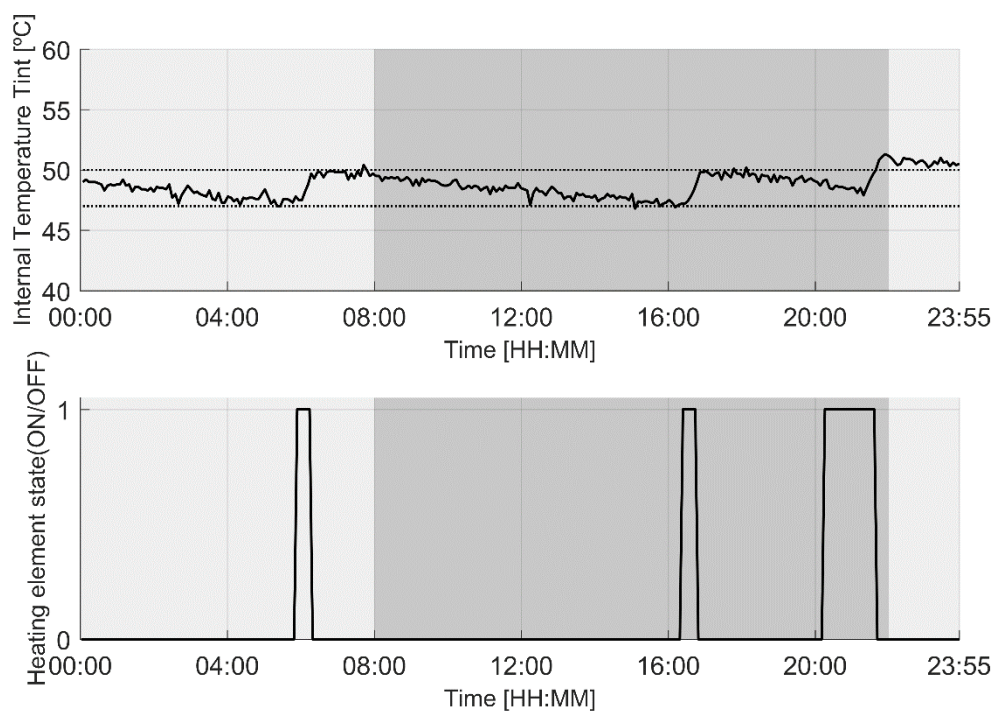


Figura A.11 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário O com consumo às 20:00.

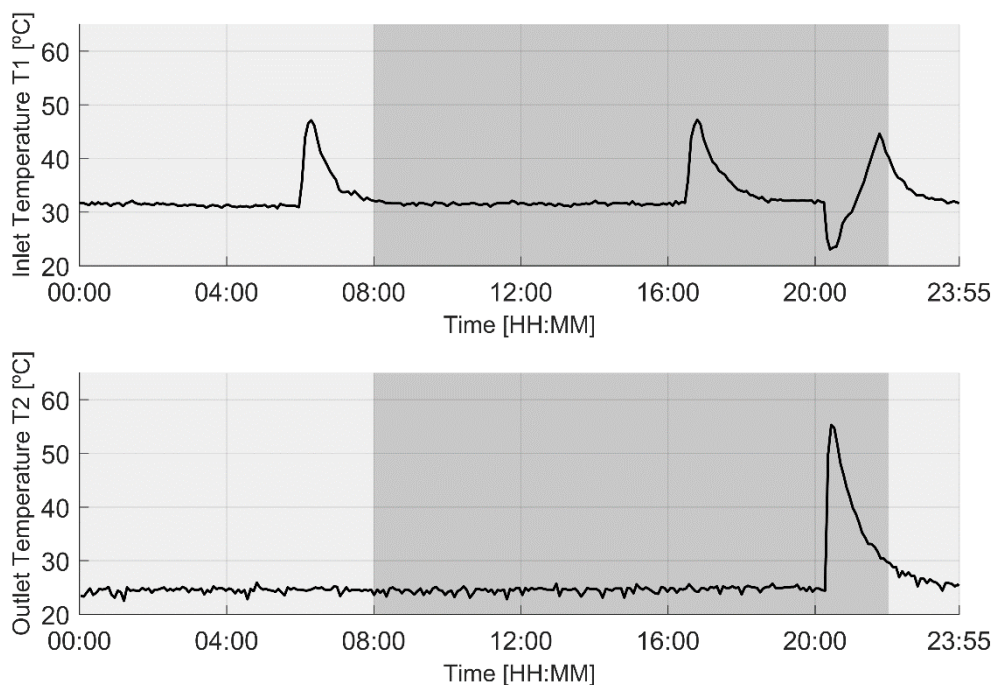


Figura A.12 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário O com consumo às 20:00.

Cenário T50 - Consumo às 00:00

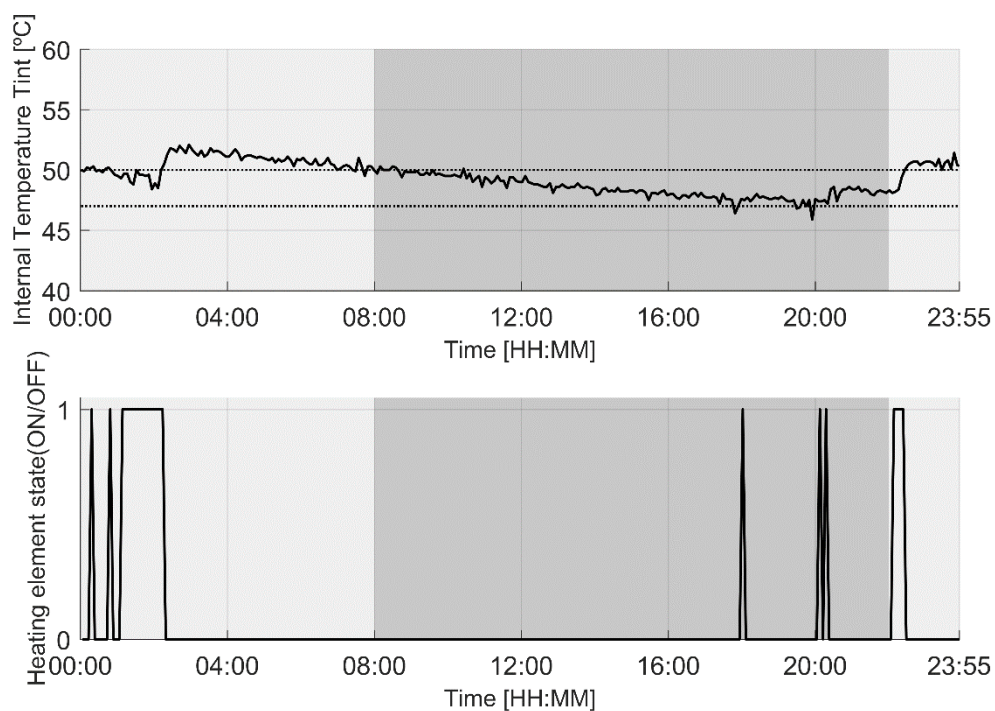


Figura A.13 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 00:00.

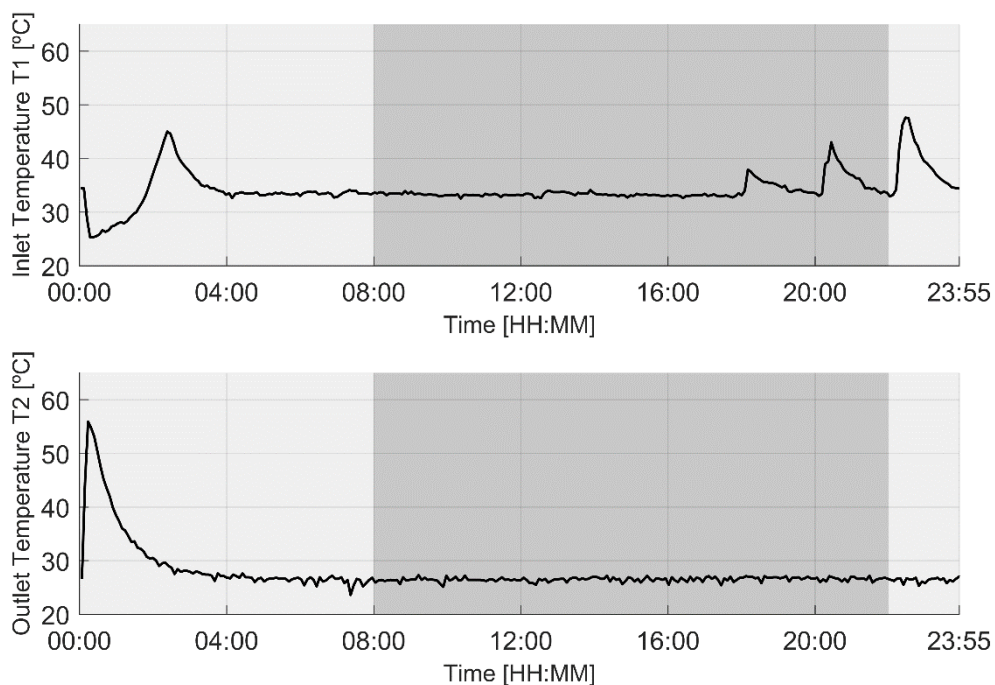


Figura A.14 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 00:00.

Cenário T50 - Consumo às 04:00

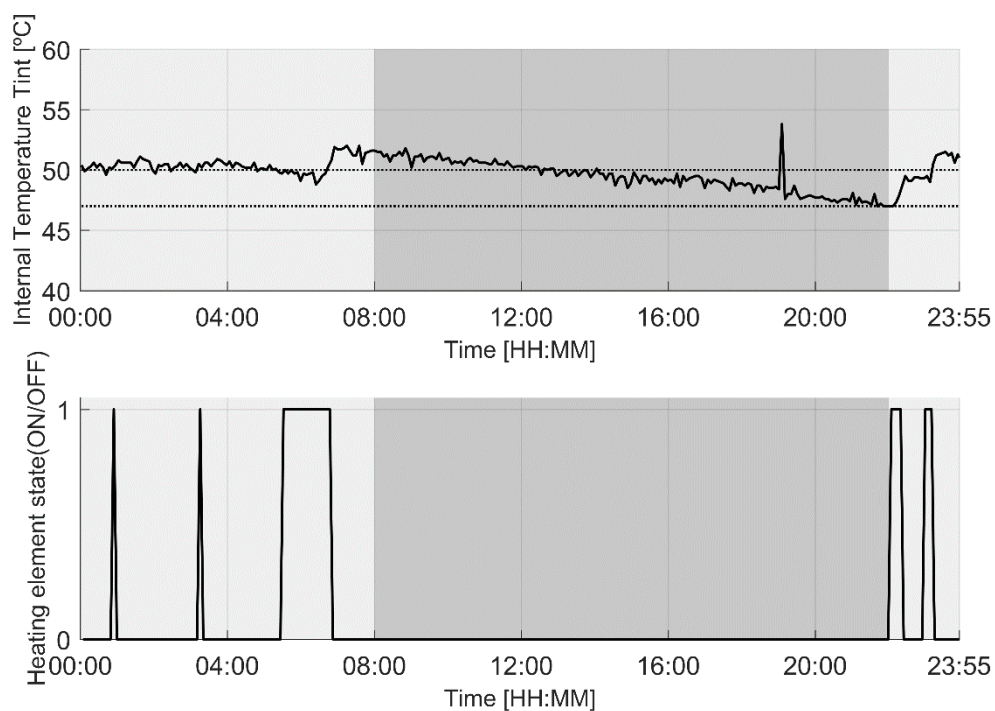


Figura A.15 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 04:00.

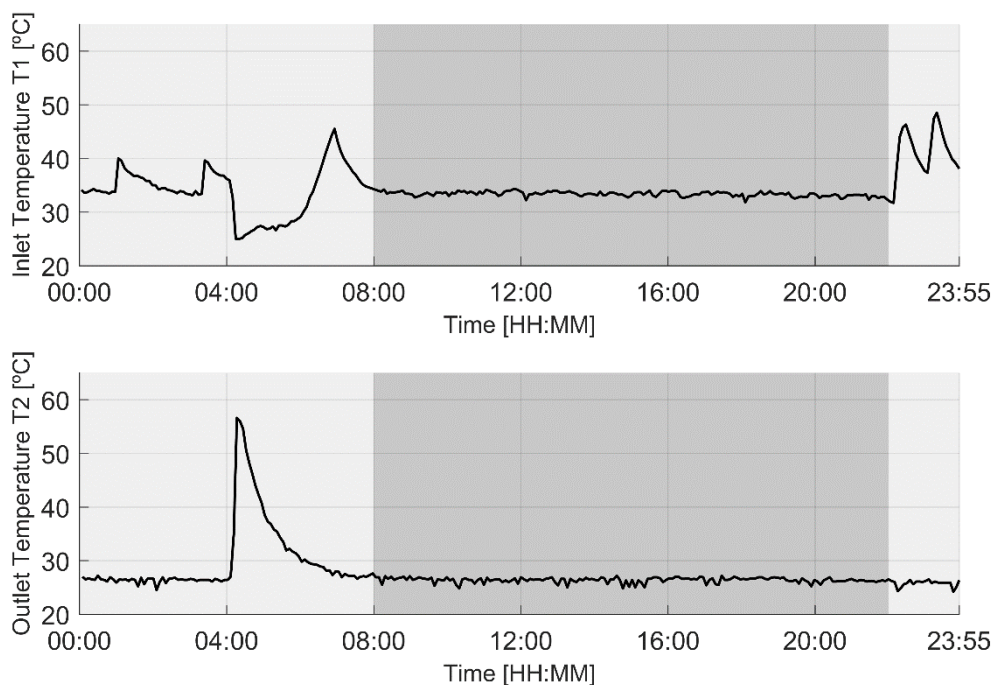


Figura A.16 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 04:00.

Cenário T50 - Consumo às 08:00

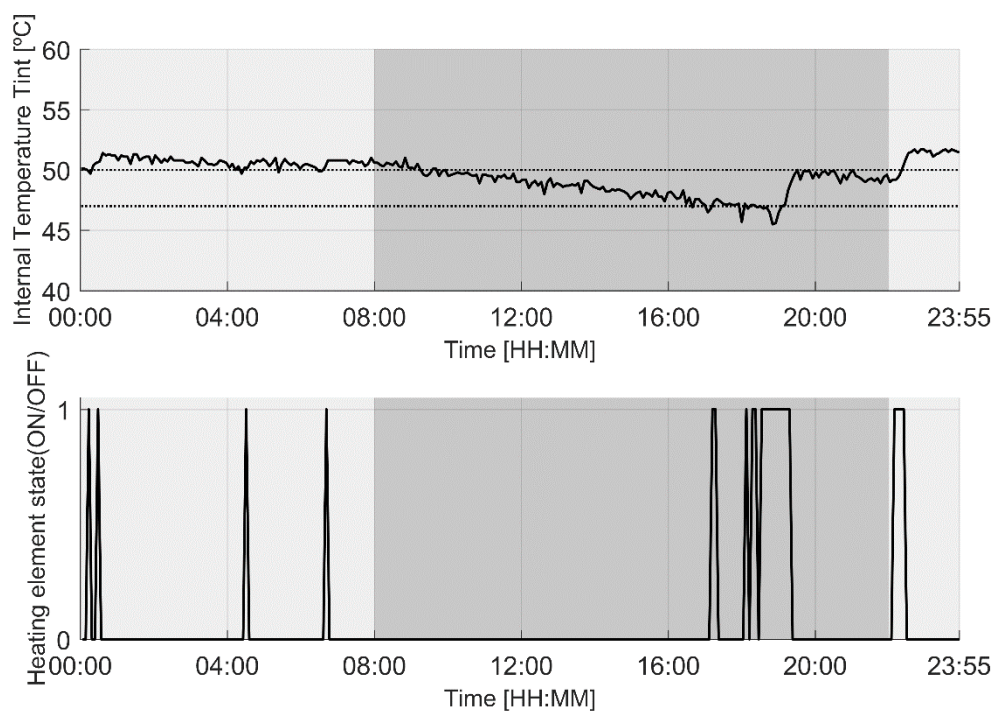


Figura A.17 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 08:00.

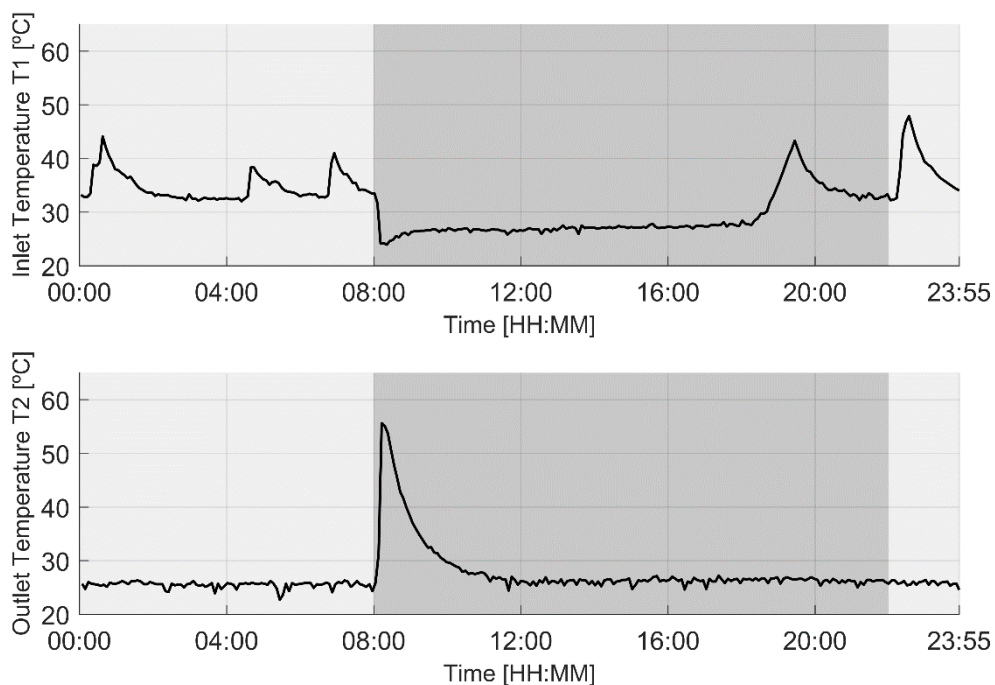


Figura A.18 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 08:00.

Cenário T50 - Consumo às 12:00

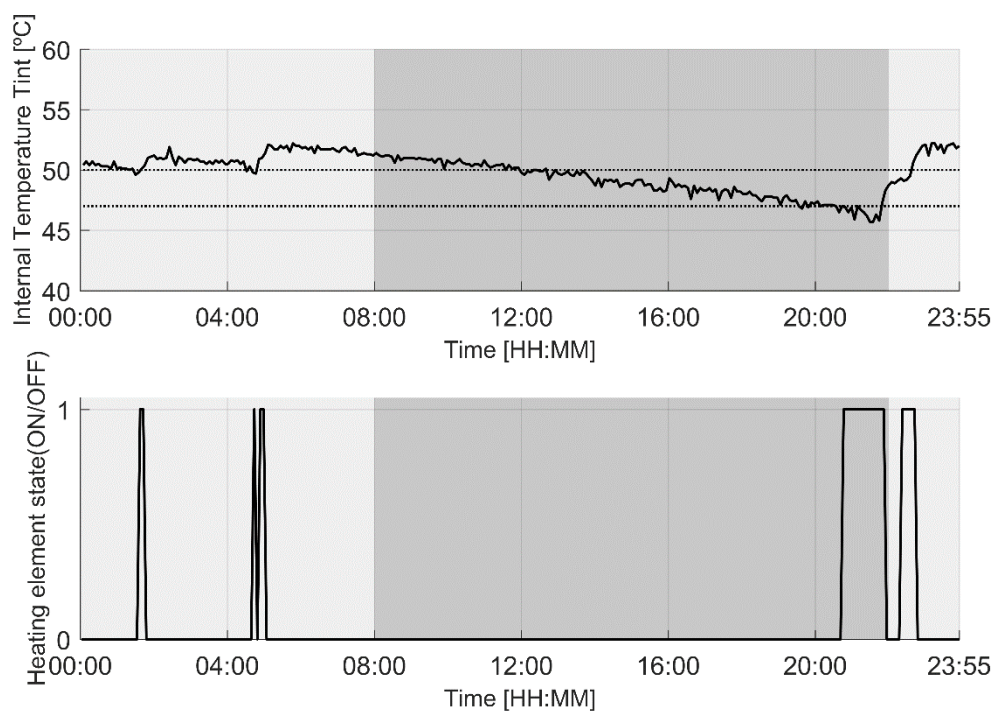


Figura A.19 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 12:00.

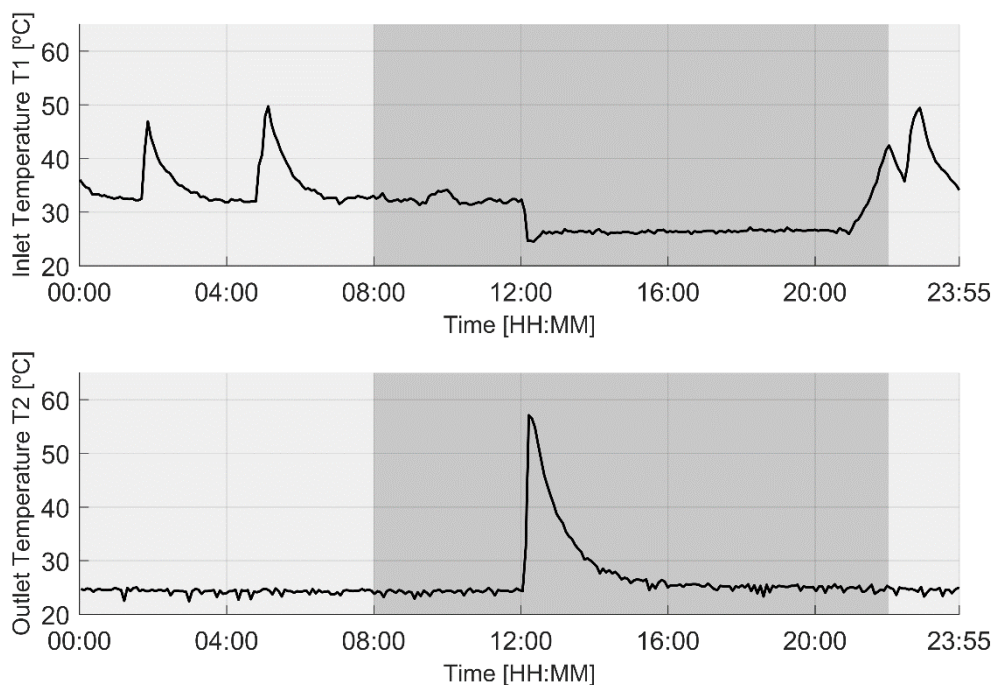


Figura A.20 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 12:00.

Cenário T50 - Consumo às 16:00

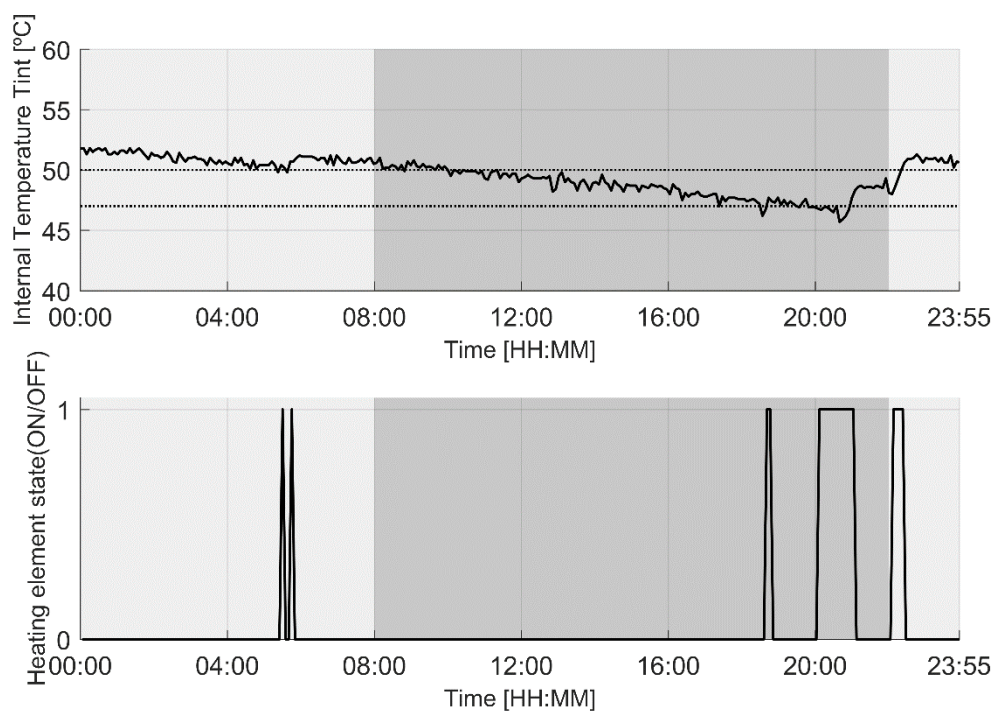


Figura A.21 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 16:00.

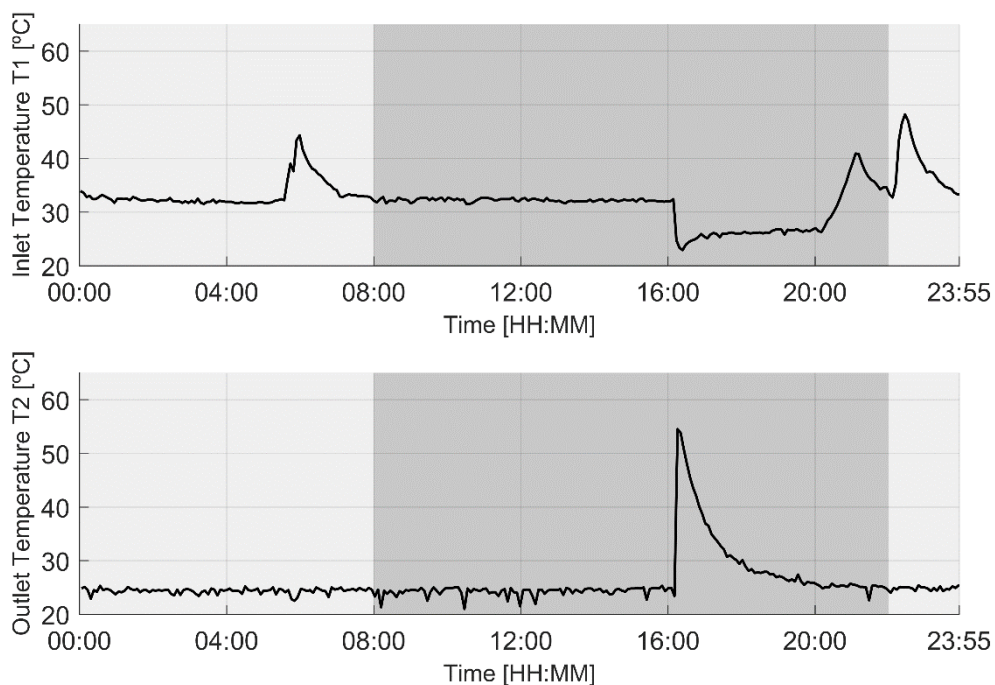


Figura A.22 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 16:00.

Cenário T50 - Consumo às 20:00

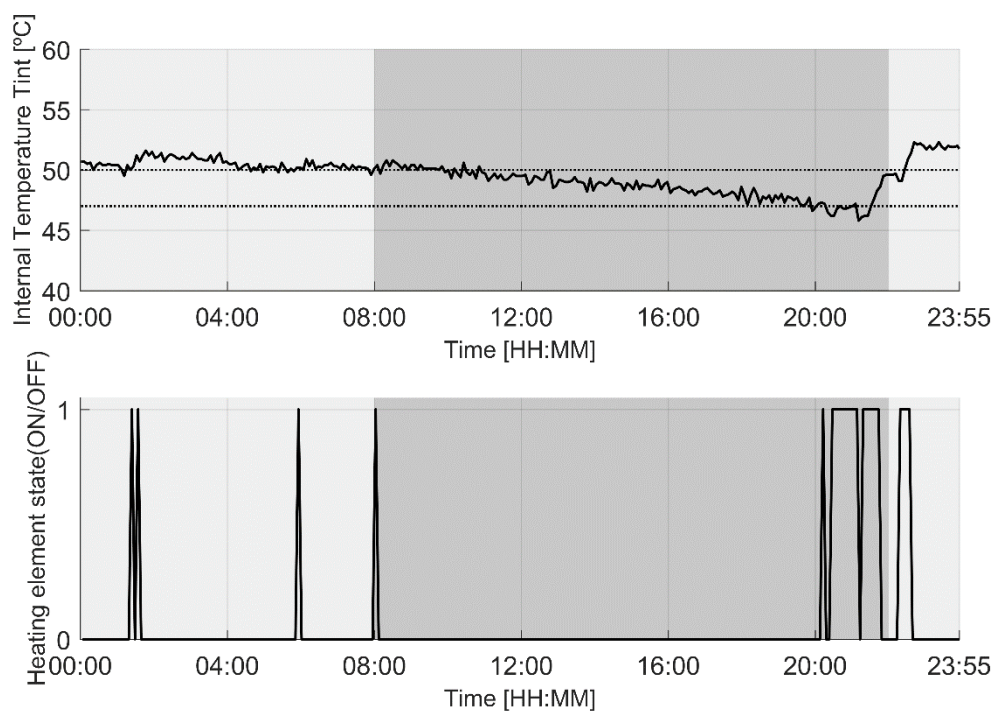


Figura A.23 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T50 com consumo às 20:00.

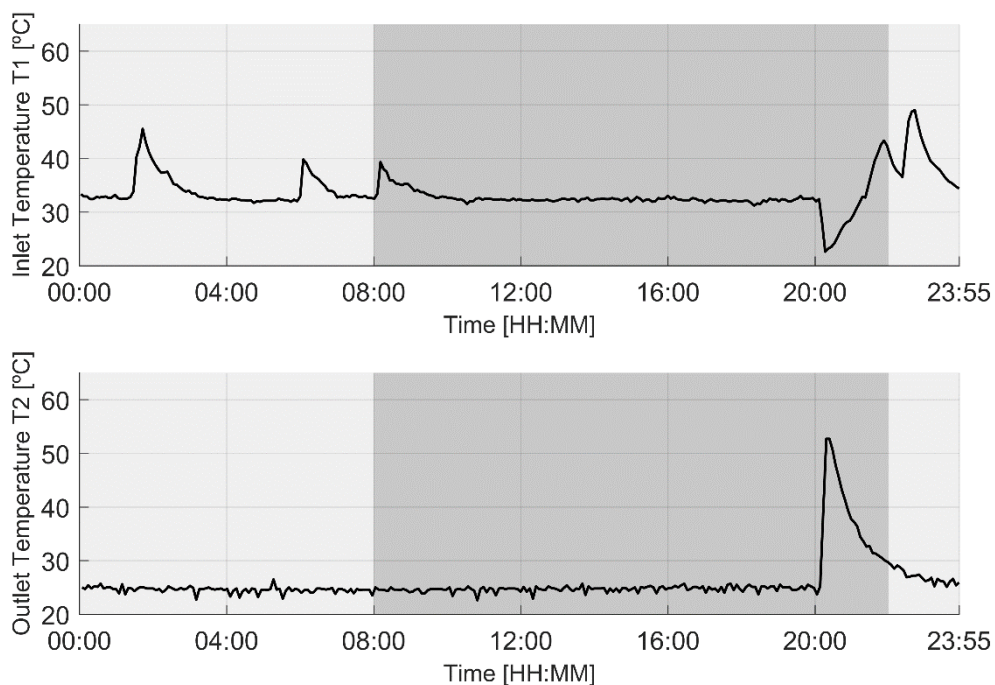


Figura A.24 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T50 com consumo às 20:00.

Cenário T55 - Consumo às 00:00

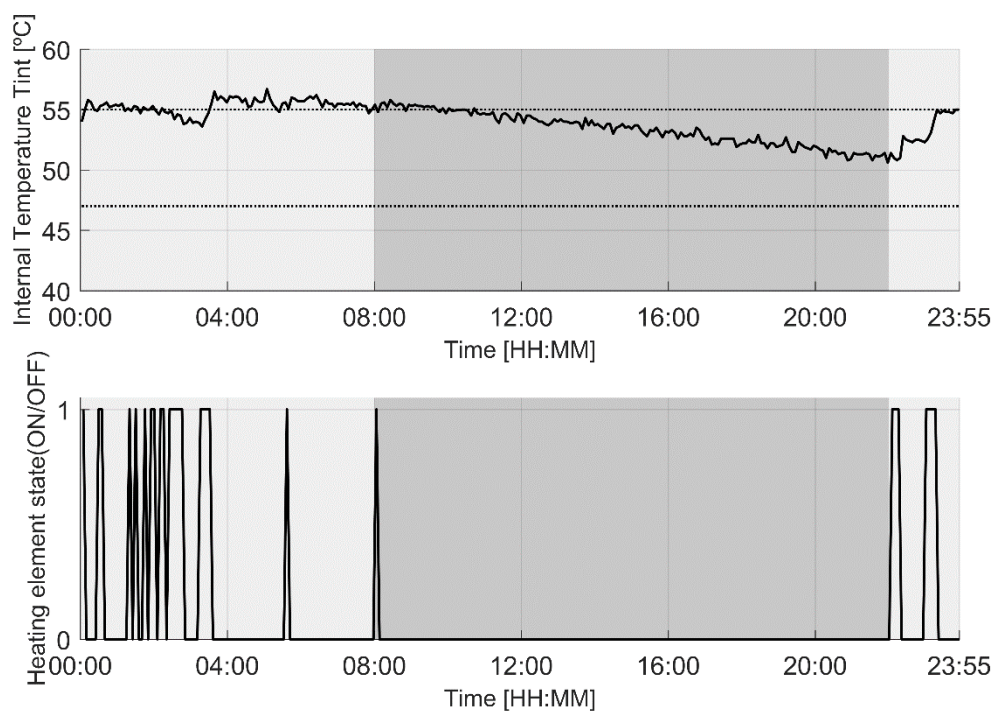


Figura A.25 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 00:00.

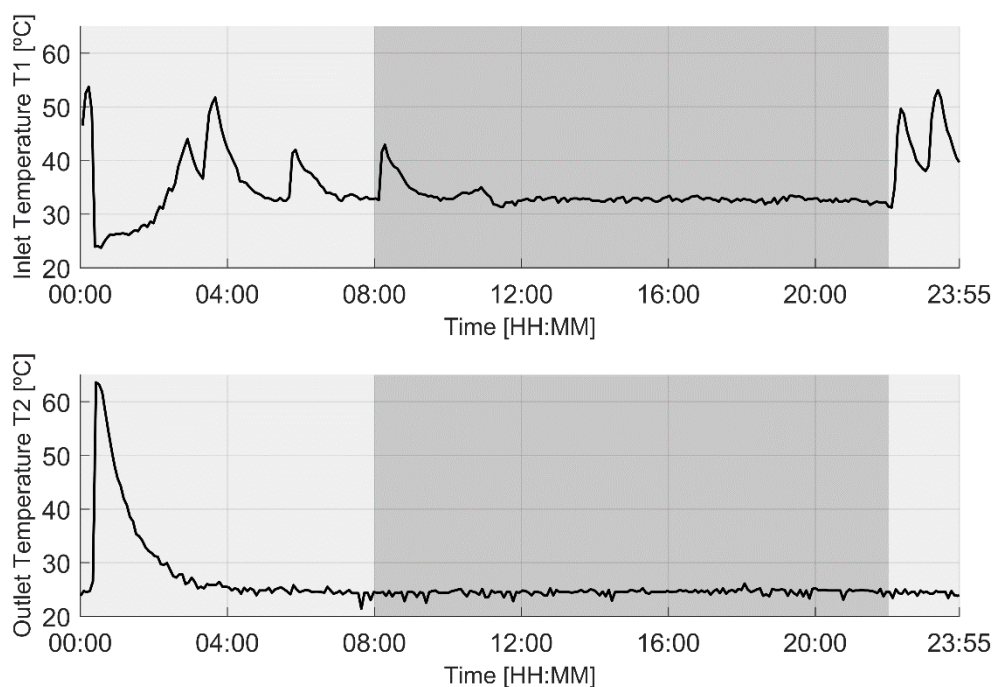


Figura A.26 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 00:00.

Cenário T55 - Consumo às 04:00

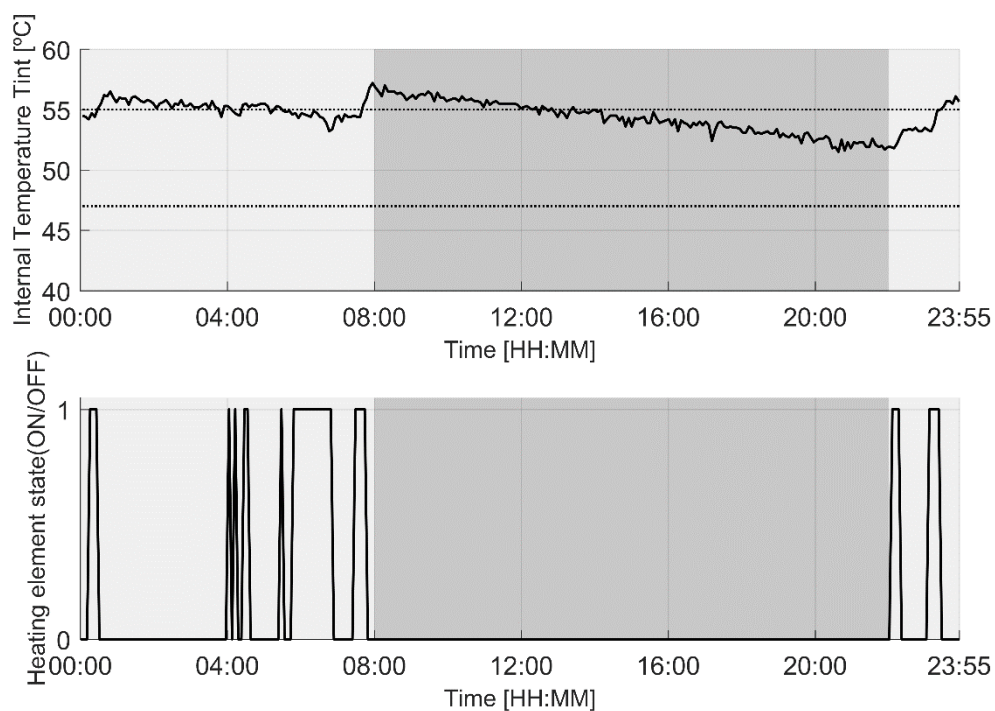


Figura A.27 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 04:00.

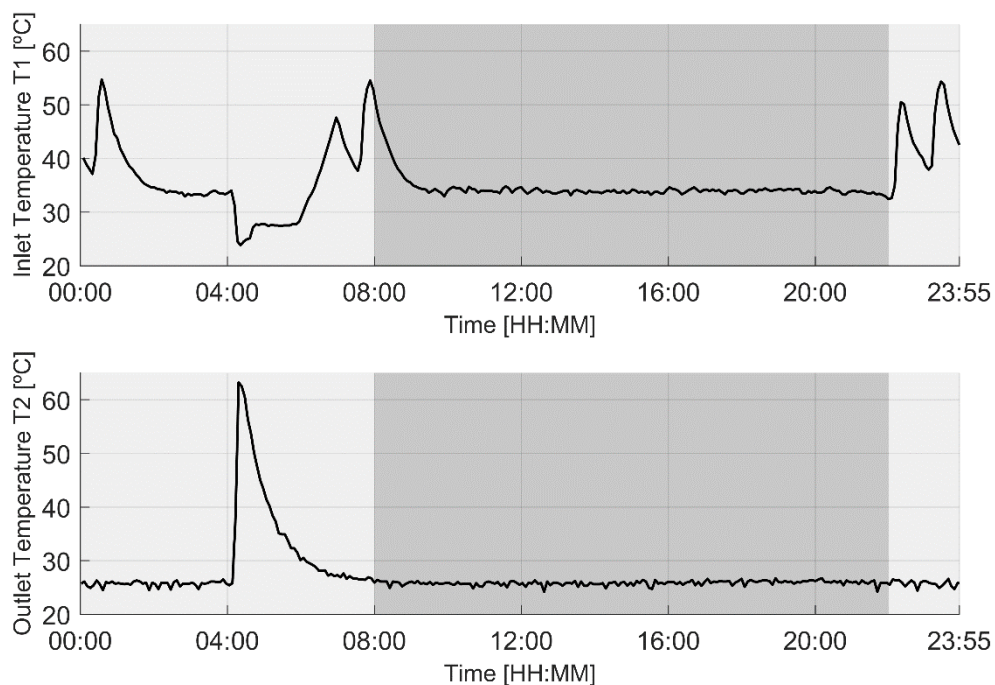


Figura A.28 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 04:00.

Cenário T55 - Consumo às 08:00

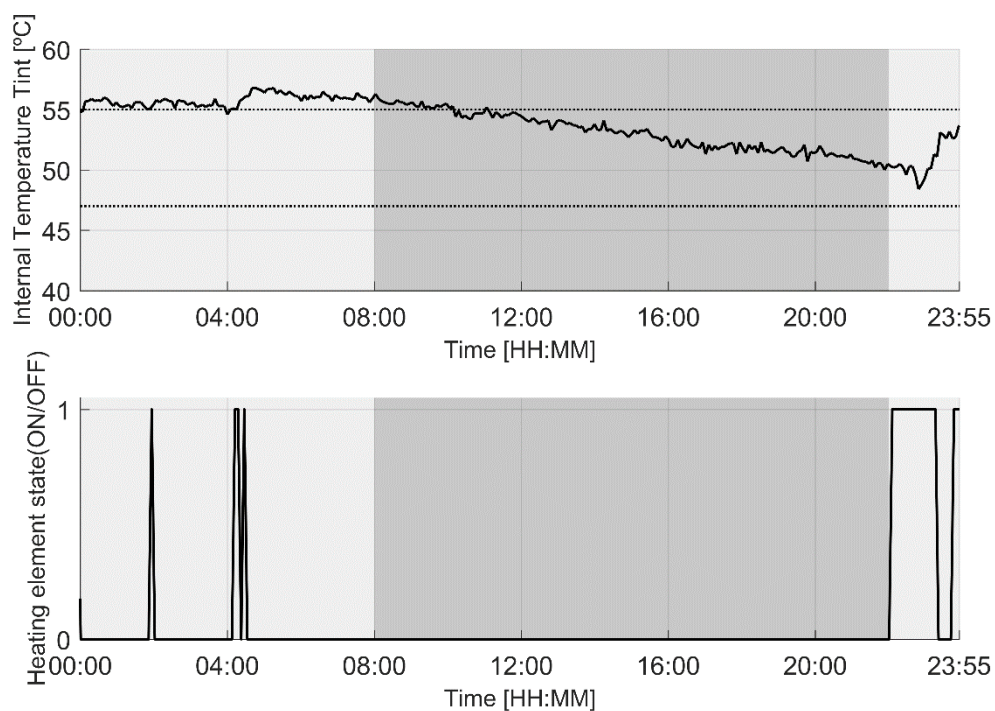


Figura A.29 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 08:00.

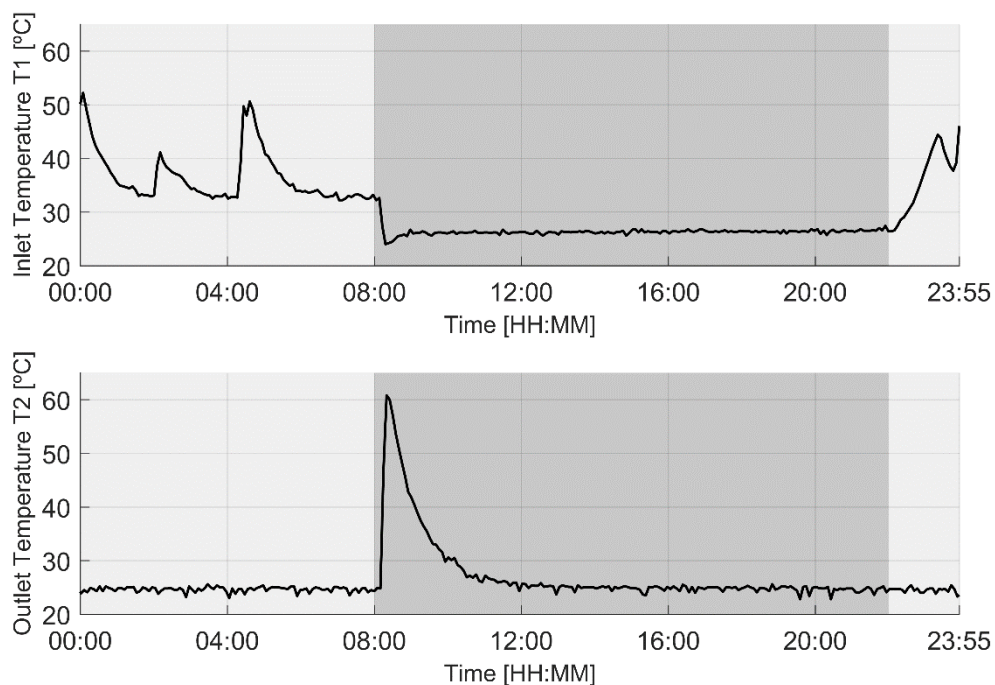


Figura A.30 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 08:00.

Cenário T55 - Consumo às 12:00

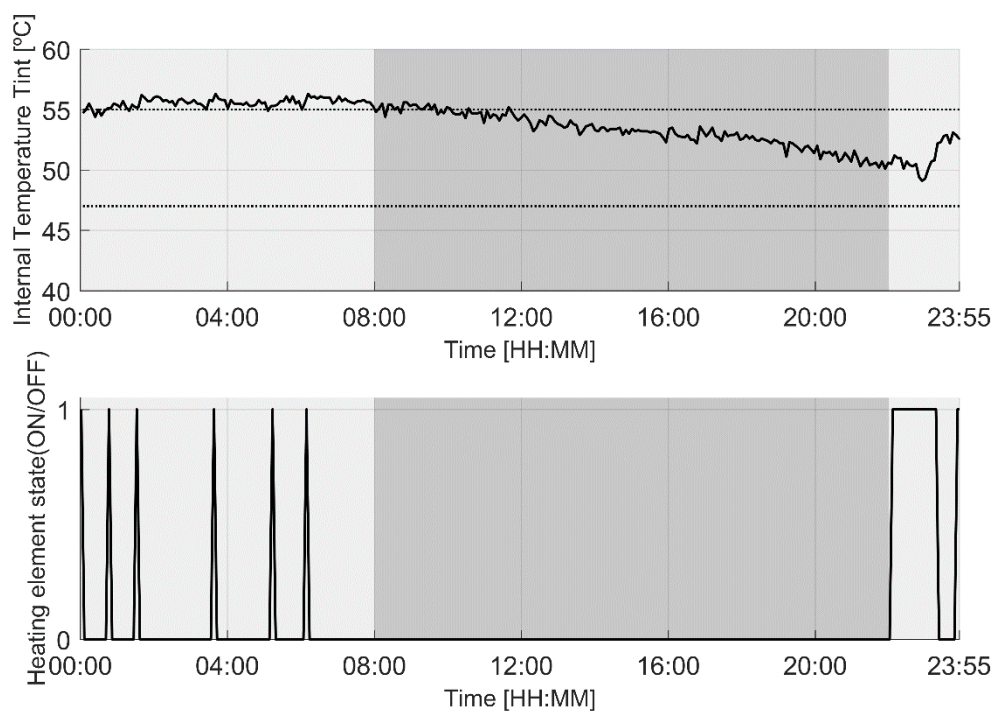


Figura A.31 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 12:00.

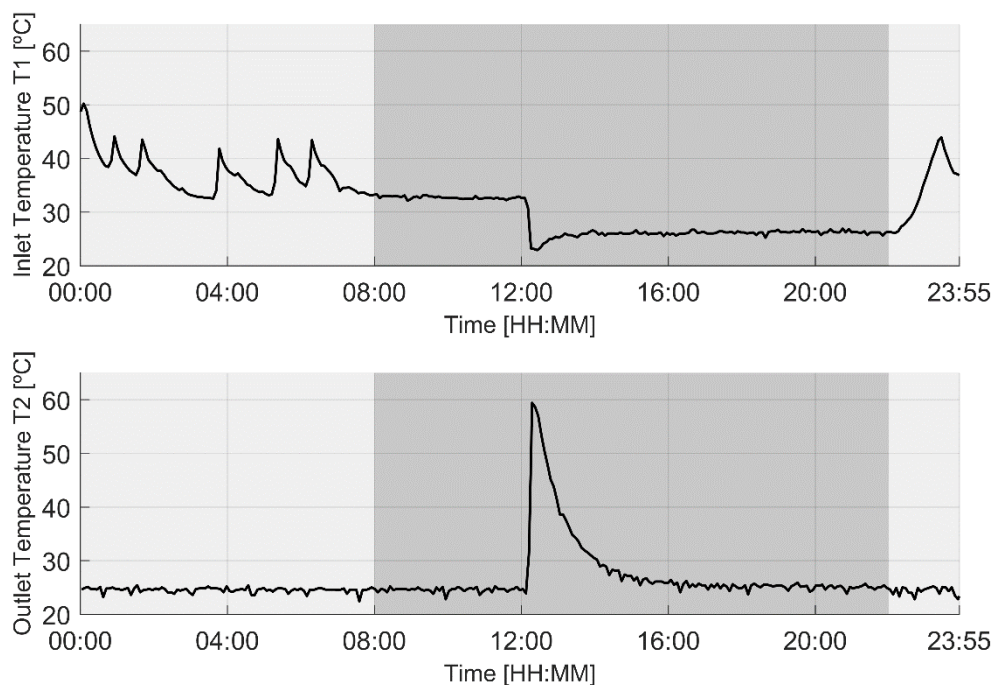


Figura A.32 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 12:00.

Cenário T55 - Consumo às 16:00

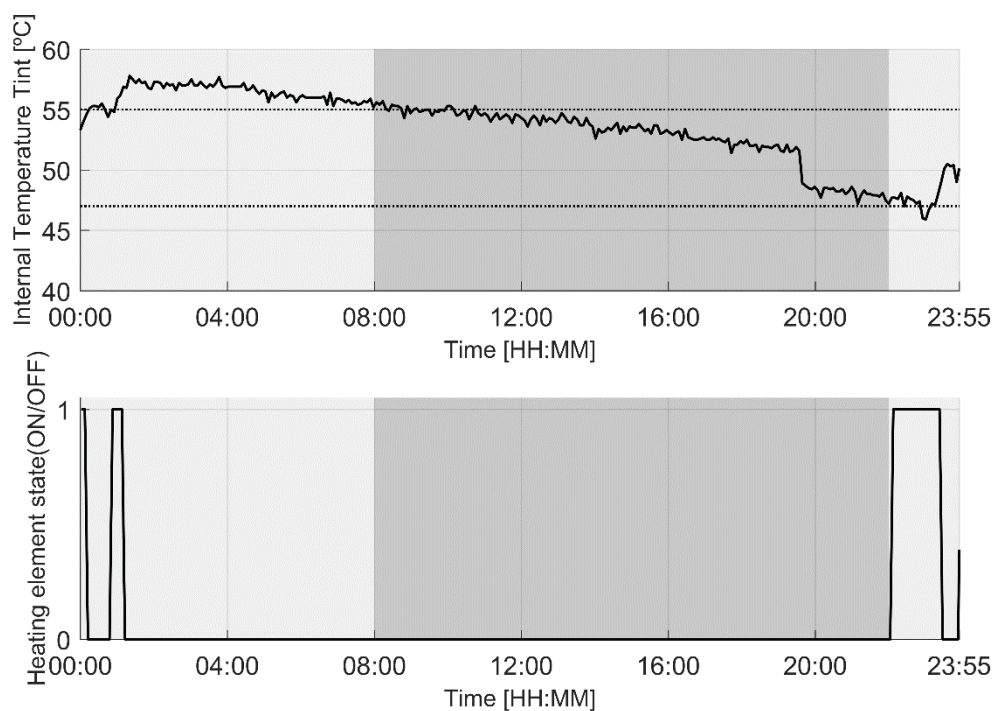


Figura A.33 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 16:00.

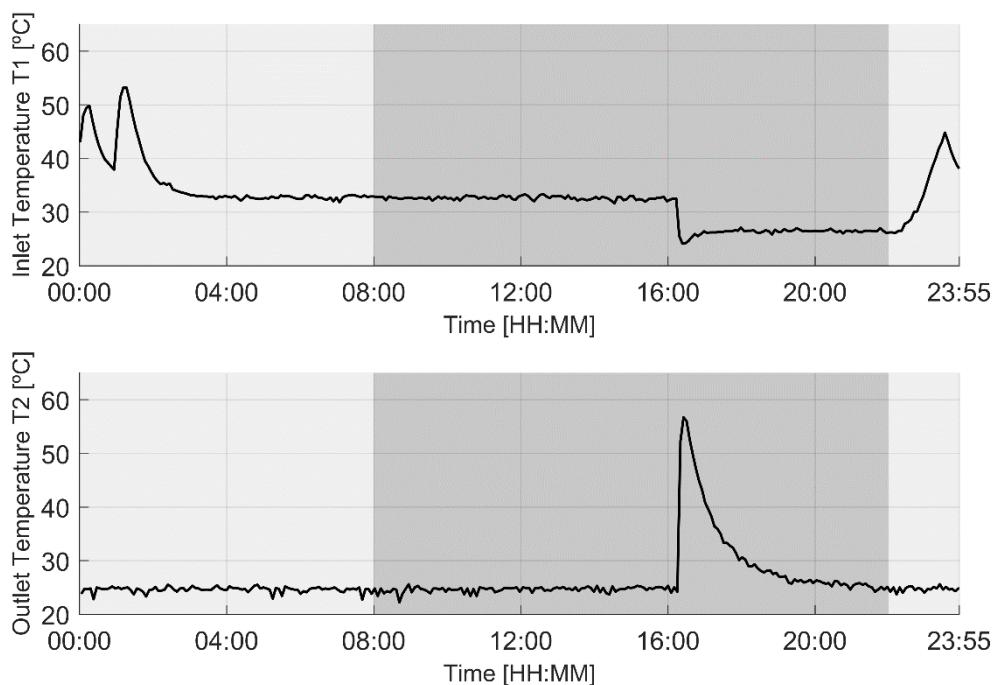


Figura A.34 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 16:00.

Cenário T55 - Consumo às 20:00

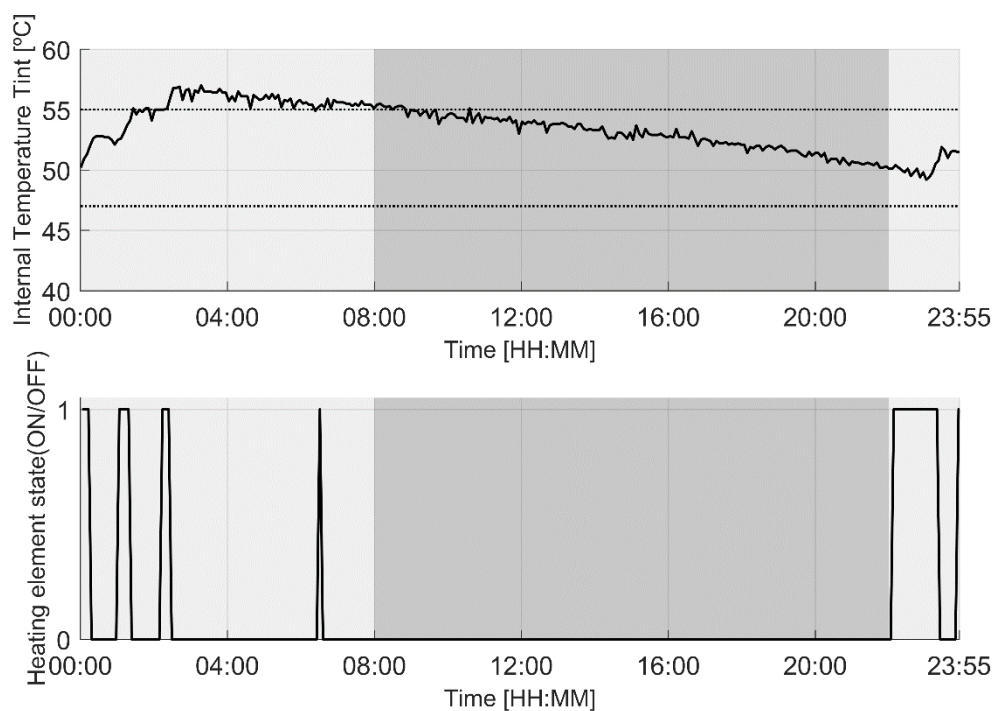


Figura A.35 – Temperatura interna e funcionamento do elemento de aquecimento no Cenário T55 com consumo às 20:00.

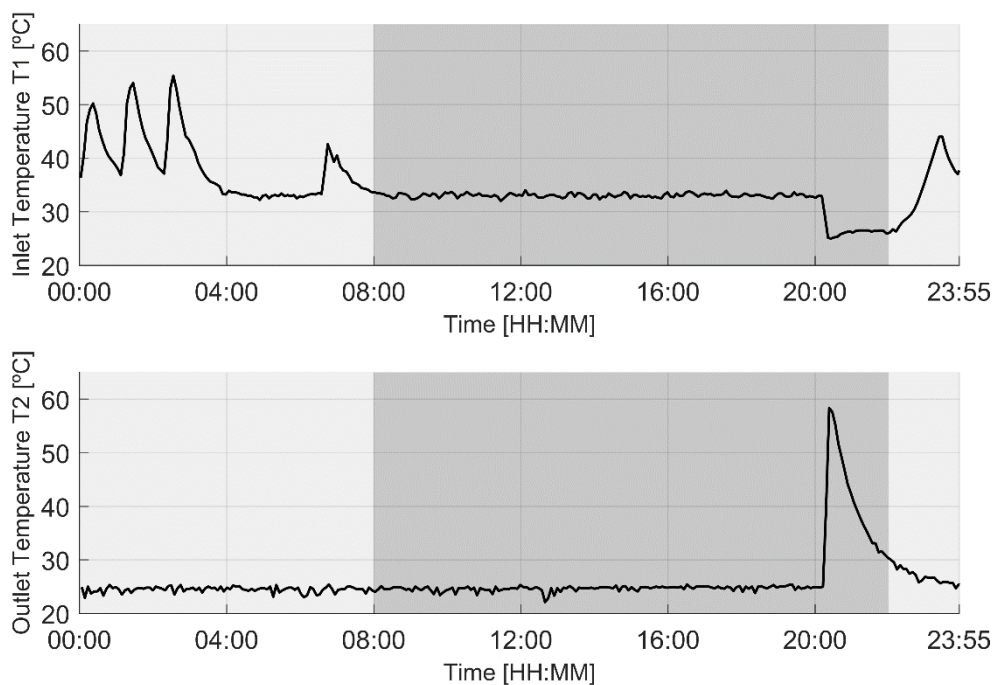


Figura A.36 – Temperaturas de entrada e saída do termoacumulador no Cenário T55 com consumo às 20:00.